

Tecnológico de Costa Rica  
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



**Desarrollo del centro de mecanizado, en el departamento de  
modelos y prototipos de la empresa Modelado y Fundición  
Saborío, mediante una mesa router CNC**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Sebastián Obando Castro

Cartago, , 2019

Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica  
Proyecto de Graduación  
Acta de Aprobación

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

---

Ing. Paula Monge Chanto  
Profesora Lectora

---

Ing. Arnoldo Ramírez Jiménez  
Profesor Lector

---

Ing. Jaime Mora Meléndez  
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 24 de julio de 2019



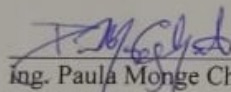
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

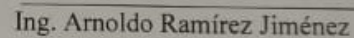
Estudiante: Sebastián Obando Castro

Proyecto: Desarrollo del centro de mecanizado, en el departamento de modelos y prototipos de la empresa Modelado y Fundición Saborío, mediante una mesa router CNC.

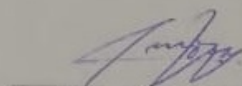
Miembros del Tribunal

  
Ing. Paula Monge Chanto

Docente lector

  
Ing. Arnoldo Ramírez Jiménez

Docente lector

  
Ing. Jaime Mora Meléndez

Docente asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Cartago, miércoles 24 de julio 2019

**Figura 1:** Acta de aprobación digitalizada

## **Declaratoria de autenticidad**

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 1 de agosto de 2019

Firma del autor

Sebastián Obando Castro

Céd: 114880557

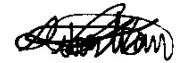
## Declaratoria de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 1 de agosto de 2019



Firma del autor

Sebastián Obando Castro

Céd: 114880557

**Figura 2:** Declaratoria de autenticidad digitalizada

# Resumen

El proyecto será realizado en el departamento de modelos y prototipos de la empresa MOFUSA ubicada en Pavas, San José. El problema a resolver radica en que el proceso para la fabricación de modelos y prototipos se hace manualmente por un solo modelista, lo que en ciertos momentos ocasiona tener que tercerizar los trabajos o no dar abasto con la demanda. Dar solución a este problema traerá beneficios como: dibujar los modelos y prototipos usando herramientas CAD 2D y 3D para no dar espacio a interpretaciones, facilitando el proceso de diseño y ahorrando costos en fabricación de muestras para presentar ante el cliente. Se obtendrá precisión en las operaciones de corte y grabado, especialmente ante geometrías curvas. El tiempo para la elaboración de las piezas disminuirá y la productividad se elevará. El sistema tendrá una interfaz gráfica donde el operador podrá controlar la máquina, observar el desarrollo de las operaciones y modificar los parámetros de la máquina para conseguir cortes y/o grabados efectivos. Además se propondrá el diseño de una aplicación móvil para monitorear desempeño y estado de la máquina durante las operaciones. Para darle solución a este problema, se pretende diseñar una mesa router de tres ejes con control numérico por computadora (CNC).

**Palabras clave:** Modelos; Prototipos; Mesa Router; Control Numérico por Computadora; CNC.

# Abstract

The project will be carried out in the department of models and prototypes of the company MOFUSA located in Pavas, San José. The problem to solve is that the process for the manufacture of models and prototypes is done manually by a single modeler, which in certain moments causes to outsource the work or not to cope with the demand. Solving this problem will bring benefits such as: drawing models and prototypes using 2D and 3D CAD tools to not give space to interpretations, facilitating the design process and saving costs in manufacturing samples to present to the client. Accuracy will be obtained in cutting and engraving operations, especially curved geometries. The time for the elaboration of the pieces will decrease and the productivity will rise. The system will have a graphical interface where the operator can control the machine, observe the development of the operations and modify the parameters of the machine to get cuts and / or effective engravings. In addition, the design of a mobile application will be proposed to monitor performance and state of the machine during operations. To solve this problem, we intend to design a three-axis router table with numerical control by computer (CNC).

**Keywords:** Models; Prototypes; Router table; Computer Numerical Control; CNC.

## Dedicatoria

*A mi madre por estar siempre pendiente de lo que necesitara.*

*A mi abuelita por darme los mejores consejos y creer ciegamente en mí.*

*A mi tía Jeannette por su comprensión.*

*A mi hermana Amanda por verme como una figura a seguir.*

# Agradecimientos

*Al profesor Jaime Mora Meléndez, por su aporte e interés durante el desarrollo del proyecto.*

*Al profesor Eduardo Interiano Salguero por evacuar mis dudas aunque no fuese miembro de mi tribunal.*

*En MOFUSA a don Vinicio Saborío, don Carlos Canales y don Arturo Bonilla, por su colaboración para lograr la conclusión satisfactoria del proyecto.*

# Índice general

Índice de figuras	iv
Índice de tablas	viii
Lista de símbolos y abreviaciones	ix
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Entorno del proyecto . . . . .	1
1.2 Definición del problema . . . . .	2
1.2.1 Generalidades . . . . .	2
1.2.2 Síntesis del problema . . . . .	3
1.3 Justificación del proyecto . . . . .	3
1.4 Objetivos del proyecto . . . . .	4
1.4.1 Objetivo general . . . . .	4
1.4.2 Objetivos específicos . . . . .	4
1.5 Alcance . . . . .	4
1.6 Limitaciones . . . . .	5
<b>2 Marco teórico</b>	<b>6</b>
2.1 ¿Qué es un router CNC? . . . . .	6
2.1.1 Router . . . . .	6
2.1.2 CNC . . . . .	6
2.1.3 Router CNC . . . . .	7
2.1.4 Código G . . . . .	9
2.2 Diseño Mecánico . . . . .	10
2.2.1 Materiales para el diseño del armazón . . . . .	10
2.2.2 Motores a pasos y tornillos de transmisión . . . . .	10
2.2.3 Cadenas Portacables . . . . .	10
2.3 Sistema Eléctrico . . . . .	10
2.3.1 Alimentación general . . . . .	10
2.3.2 Control automático . . . . .	11
2.3.3 Protecciones . . . . .	11
2.4 Presupuesto inicial y propuestas para el centro de mecanizado CNC . . . . .	11
2.5 Proceso para operaciones por CNC . . . . .	12



2.6	Programa de mantenimiento preventivo basado en el RCM . . . . .	13
2.6.1	Plan de mantenimiento . . . . .	13
2.6.2	RCM . . . . .	13
2.6.3	Partes del RCM . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Solución</b>	<b>15</b>
3.1	Determinación de las variables a controlar . . . . .	15
3.1.1	Requerimientos . . . . .	16
3.1.2	Especificaciones . . . . .	17
3.1.3	Variables a controlar . . . . .	17
3.2	Componentes . . . . .	18
3.2.1	Fuentes de poder . . . . .	18
3.2.2	Actuadores . . . . .	18
3.2.3	Controladores . . . . .	19
3.2.4	Sensores . . . . .	19
3.3	Sistema de control automático . . . . .	20
3.3.1	Requerimientos . . . . .	21
3.3.2	Especificaciones . . . . .	21
3.3.3	Entradas . . . . .	22
3.3.4	Salidas . . . . .	22
3.3.5	Tarjeta Controladora . . . . .	22
3.3.6	Variador de frecuencia . . . . .	25
3.3.7	Circuito de adaptación entre sensores y tarjeta controladora . . . . .	29
3.3.8	Interruptores inductivos como finales de carrera . . . . .	29
3.3.9	Controladores de micropasos . . . . .	30
3.4	Validación de los motores a pasos y sus respectivos controladores . . . . .	31
3.4.1	Determinación del torque . . . . .	31
3.4.2	Pruebas de concepto . . . . .	34
3.5	Calibración de los ejes coordenados mediante herramienta de software controlador . . . . .	43
3.6	Verificación de tornillo del Eje Z autoasegurante . . . . .	48
3.7	Validación del armazón . . . . .	48
3.7.1	Inspección visual . . . . .	48
3.7.2	Análisis estático debido a la flexión . . . . .	48
3.8	Interfaz de usuario . . . . .	52
3.8.1	Mach3 . . . . .	52
3.8.2	Paro de emergencia manual . . . . .	52
3.8.3	Sensor auto zeta. . . . .	55
3.8.4	Protección de tensión . . . . .	57
3.8.5	Pruebas de concepto de todo el sistema de control . . . . .	60
3.9	Plan de mantenimiento . . . . .	65
3.10	Inversión económica . . . . .	65

<b>4</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>67</b>
4.1	Validación de la armadura . . . . .	67
4.1.1	Inspección visual . . . . .	67
4.1.2	Análisis estático debido a la flexión . . . . .	67
4.1.3	Verificación de tornillo del Eje Z autoasegurante . . . . .	68
4.2	Validación de los motores a pasos . . . . .	68
4.2.1	Determinación del torque . . . . .	68
4.3	Sistema de Control automático . . . . .	69
4.3.1	Tarjeta Controladora . . . . .	69
4.3.2	Variador de frecuencia . . . . .	69
4.3.3	Circuito de adaptación entre sensores y tarjeta controladora . . . . .	69
4.3.4	Controladores de micro pasos . . . . .	70
4.3.5	Pruebas de concepto de todo el sistema de control . . . . .	70
4.4	Inversión económica . . . . .	70
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>72</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>
<b>A</b>	<b>Imágenes de la máquina anterior</b>	<b>77</b>
<b>B</b>	<b>Planos de conexiones eléctricas</b>	<b>80</b>
<b>C</b>	<b>Programa de mantenimiento preventivo</b>	<b>82</b>
C.1	Lista de salarios 2019 según MTSS . . . . .	89
<b>D</b>	<b>Planos Mecánicos</b>	<b>91</b>
<b>E</b>	<b>Herramienta para estimación de torque para los motores a pasos</b>	<b>104</b>
<b>F</b>	<b>Imágenes Varias del progreso de la máquina</b>	<b>107</b>

# Índice de figuras

1	Acta de aprobación digitalizada . . . . .	c
2	Declaratoria de autenticidad digitalizada . . . . .	e
2.1	Diagrama del funcionamiento de una máquina con CNC. Fuente: [10] . . .	7
2.2	Presupuesto inicial para el desarrollo del centro de mecanizado. Fuente: elaboración propia . . . . .	12
2.3	Diagrama de proceso para operaciones por CNC. Fuente: [36] . . . . .	13
3.1	Circuito de adaptación para interruptor inductivo. Fuente: Elaboración propia . . . . .	20
3.2	Tarjeta controladora de 5 ejes con interfaz Mach3. Fuente: [11] . . . . .	23
3.3	Botón de accionamiento para el <i>spindle</i> en Mach3. Fuente: elaboración propia . . . . .	23
3.4	Ampliación de tarjeta controladora de 5 ejes con interfaz Mach3. Fuente: elaboración propia . . . . .	24
3.5	Prueba de concepto en ejecución. Fuente: elaboración propia . . . . .	24
3.6	Indicación sobre conexión entre <i>spindle</i> y variador Fuente: [15] . . . . .	25
3.7	Conexión entre variador y tarjeta controladora. Fuente: elaboración propia	26
3.8	Prueba de concepto al variador empleando la escala de frecuencia. Fuente: elaboración propia . . . . .	27
3.9	Circuito del tacómetro de bajo costo. Fuente: elaboración propia . . . . .	28
3.10	Prueba de concepto al variador empleando el tacómetro de bajo costo. Fuente: elaboración propia . . . . .	29
3.11	Esquema de conexión del circuito de adaptación entre sensores y tarjeta controladora. Fuente: elaboración propia . . . . .	30
3.12	Circuito de adaptación entre sensores y tarjeta controladora. Fuente: Elab- oración propia . . . . .	30
3.13	PCB del circuito de adaptación entre sensores y tarjeta controladora. Fuente: elaboración propia . . . . .	31
3.14	Imagen ilustrativa del modelado del carro y el equipo real. Fuente: elabo- ración propia . . . . .	32
3.15	Simulación de la masa de la carga del eje Y. Fuente: SolidWorks 2016 . . .	32
3.16	Imagen ilustrativa del modelado del conjunto soportado por el eje X y su versión real. Fuente: elaboración propia . . . . .	33
3.17	Simulación de la masa de la carga del eje X. Fuente: SolidWorks 2016 . . .	34

3.18	Modelado del conjunto soportado por el eje Z. Fuente: elaboración propia .	35
3.19	Simulación de la masa de la carga del eje Z. Fuente: SolidWorks 2016 . . .	36
3.20	Diagrama de conexión entre integrado L298N, Arduino y motor a pasos. Fuente: elaboración propia . . . . .	36
3.21	Imagen de conexión entre integrado L298N y motor a pasos. Fuente: elaboración propia . . . . .	37
3.22	Diagrama de conexión entre driver CW5045, Arduino y motor a pasos. Fuente: elaboración propia . . . . .	38
3.23	Imagen de contorno ejecutado según el código G de ejemplo. Fuente: [5] . .	38
3.24	Imagen de conexión entre driver CW5045, tarjeta controladora y motor a pasos. Fuente: elaboración propia . . . . .	39
3.25	Captura de pantalla de programa en Código G. Fuente: elaboración propia	40
3.26	Diagrama de conexión entre driver CW5045, tarjeta controladora y motor a pasos. Fuente: elaboración propia . . . . .	41
3.27	Conexión entre driver CW5045 y motor a pasos. Fuente: elaboración propia	41
3.28	Acople elastómero. Fuente: [37] . . . . .	42
3.29	Fallo de acople original. Fuente: Elaboración propia . . . . .	42
3.30	Fórmulas para el cálculo de pasos efectivos por revolución. Fuente: elaboración propia . . . . .	43
3.31	Imagen del compás de precisión utilizado para trasladar medidas. Fuente: elaboración propia . . . . .	44
3.32	Último valor arrojado por la herramienta de calibración. Fuente: Mach3 .	45
3.33	Prueba de calibración eje Z. Fuente: Mach3 . . . . .	45
3.34	Cortes para la calibración de los ejes X Y. Fuente: elaboración propia. . . .	46
3.35	Prueba de calibración ejes X Y. Fuente: Mach3 . . . . .	47
3.36	Primer DCL para la viga que simula los ejes X y Y. Fuente: [42] . . . . .	49
3.37	DCL de la flexión presente en el eje X. Fuente: elaboración propia . . . . .	51
3.38	Ventana principal para el operador en Mach3. Fuente: elaboración propia .	53
3.39	Ventana secundaria para el operador en Mach3. Fuente: elaboración propia	54
3.40	Pulsador de seguridad para paro de emergencia . Fuente: [28] . . . . .	54
3.41	Gabinete de control. Fuente: elaboración propia . . . . .	54
3.42	Sensor auto zeta. Fuente: [1] . . . . .	55
3.43	Primer cuadro de diálogo para la activación del sensor auto zeta. Fuente: Mach3 . . . . .	55
3.44	Fresa hace contacto con el sensor auto zeta. Fuente: elaboración propia . .	56
3.45	Cuadro de diálogo de finalización de sensado de altura. Fuente: Mach3 . .	56
3.46	Especificación técnica para PABB-6622A. [40] . . . . .	57
3.47	Instalación pasos 1 y 2. Fuente: [40] . . . . .	58
3.48	Instalación paso 3. Fuente: [40] . . . . .	59
3.49	Instalación pasos 4 y 5. Fuente: [40] . . . . .	59
3.50	Pruebas Generales. Fuente: elaboración propia . . . . .	60
3.51	Pruebas Generales. Fuente: elaboración propia. . . . .	60
3.52	Pruebas Generales. Fuente: elaboración propia. . . . .	61

3.53 CAD de prototipo de escudo. Fuente: elaboración propia . . . . .	61
3.54 CAM de prototipo de escudo. Fuente: elaboración propia . . . . .	62
3.55 Prototipo finalizado. . . . .	62
3.56 Modelo fabricado.Fuente: elaboración propia. . . . .	63
3.57 Modelo terminado. Fuente: elaboración propia. . . . .	64
3.58 Inversión real por el centro de mecanizado. Fuente: elaboración propia . .	66
A.1 Imagen del estado de la máquina anterior. Fuente: elaboración propia . . .	77
A.2 Imagen del estado de la máquina anterior. Fuente: elaboración propia . . .	78
A.3 Imagen del estado de la máquina anterior. Fuente: elaboración propia . . .	78
A.4 Imagen del estado de la máquina anterior. Fuente: elaboración propia . . .	79
B.1 Diagrama de conexión eléctrica entre motores y su respectivos contro- ladores. Fuente: elaboración propia . . . . .	80
B.2 Diagrama de conexión eléctrica entre sensores y tarjeta controladora Fuente: elaboración propia . . . . .	81
C.1 Primera Sección RCM. Función uno Fuente: elaboración propia . . . . .	82
C.2 Primera Sección RCM. Funciones dos y tres. Fuente: elaboración propia .	83
C.3 Primera Sección RCM. Funciones cuatro y cinco. Fuente: elaboración propia	83
C.4 Segunda Sección RCM. Acción proactiva uno, parte uno. Fuente: elabo- ración propia . . . . .	83
C.5 Segunda Sección RCM. Acción proactiva uno, parte dos. Fuente: elabo- ración propia . . . . .	84
C.6 Segunda Sección RCM. Acción proactiva dos, parte uno. Fuente: elabo- ración propia . . . . .	85
C.7 Segunda Sección RCM. Acción proactiva uno, parte dos. Fuente: elabo- ración propia . . . . .	85
C.8 Segunda Sección RCM. Acción proactiva tres, parte uno. Fuente: elabo- ración propia . . . . .	86
C.9 Segunda Sección RCM. Acción proactiva tres, parte dos. Fuente: elabo- ración propia . . . . .	86
C.10 Segunda Sección RCM. Acción proactiva cuatro, parte uno. Fuente: elabo- ración propia . . . . .	87
C.11 Segunda Sección RCM. Acción proactiva cuatro, parte dos. Fuente: elabo- ración propia . . . . .	87
C.12 Segunda Sección RCM. Acción proactiva cinco, parte uno. Fuente: elabo- ración propia . . . . .	88
C.13 Segunda Sección RCM. Acción proactiva cinco, parte dos. Fuente: elabo- ración propia . . . . .	88
C.14 Primera parte de lista de salarios base 2019. Fuente: MTSS . . . . .	89
C.15 Primera parte de lista de salarios base 2019. Fuente: MTSS . . . . .	90
D.1 Planos mecánicos. Hoja 1 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	91

D.2	Planos mecánicos. Hoja 2 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	92
D.3	Planos mecánicos. Hoja 3 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	93
D.4	Planos mecánicos. Hoja 4 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	94
D.5	Planos mecánicos. Hoja 5 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	95
D.6	Planos mecánicos. Hoja 6 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	96
D.7	Planos mecánicos. Hoja 7 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	97
D.8	Planos mecánicos. Hoja 8 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	98
D.9	Planos mecánicos. Hoja 9 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	99
D.10	Planos mecánicos. Hoja 10 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	100
D.11	Planos mecánicos. Hoja 11 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	101
D.12	Planos mecánicos. Hoja 12 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	102
D.13	Planos mecánicos. Hoja 13 de 13. Fuente: elaboración propia . . . . .	103
E.1	Estimación de torque para eje X. Fuente: elaboración propia . . . . .	104
E.2	Estimación de torque para eje X. Fuente: elaboración propia . . . . .	104
E.3	Estimación de torque para eje X. Fuente: elaboración propia . . . . .	104
E.4	Estimación de torque para eje Y. Fuente: elaboración propia . . . . .	105
E.5	Estimación de torque para eje Y. Fuente: elaboración propia . . . . .	105
E.6	Estimación de torque para eje Y. Fuente: elaboración propia . . . . .	105
E.7	Estimación de torque para eje Z. Fuente: elaboración propia . . . . .	105
E.8	Estimación de torque para eje Z. Fuente: elaboración propia . . . . .	106
E.9	Estimación de torque para eje Z. Fuente: elaboración propia . . . . .	106
F.1	Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia . .	107
F.2	Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia . .	108
F.3	Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia . .	108
F.4	Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia . .	109
F.5	Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia . .	109
F.6	Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia . .	110
F.7	Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia . .	110
F.8	Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia . .	111
F.9	Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia . .	111
F.10	Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia . .	112
F.11	Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia . .	112

# Índice de tablas

2.1	Primera tabla de propuestas para el centro de mecanizado CNC.Fuente: elaboración propia . . . . .	11
2.2	Segunda tabla de propuestas para el centro de mecanizado CNC.Fuente: elaboración propia . . . . .	11
3.1	Resumen de conexión entre <i>spindle</i> y variador. Fuente: elaboración propia	25
3.2	Resumen de conexiones Variador de frecuencia y tarjeta controladora.Fuente: elaboración propia . . . . .	25
3.3	Resultados de las mediciones para las pruebas ante las revoluciones del <i>spindle</i> .Fuente: elaboración propia . . . . .	26
3.4	Resultados de las mediciones para las pruebas ante las revoluciones del <i>spindle</i> .Fuente: elaboración propia . . . . .	28
3.5	Configuración del controlador por micro pasos. . . . .	31
3.6	Resumen de conexiones entre L298N y Arduino.Fuente: elaboración propia	34
3.7	Resumen de conexiones entre L298N y motor a pasos. Fuente: Elaboración propia . . . . .	35
3.8	Resumen de conexiones entre CW5045 y Arduino. Fuente: elaboración propia . . . . .	36
3.9	Resumen de conexiones entre CW5045 y motor a pasos. Fuente: elaboración propia . . . . .	37
3.10	Resumen de conexiones entre CW5045 y tarjeta controladora. Fuente: elaboración propia . . . . .	39
3.11	Resumen de resultados para ejes X Y. Fuente: elaboración propia . . . . .	43
3.12	Resumen de resultados para ejes Z. Fuente: elaboración propia . . . . .	43
3.13	Tabla iteraciones para ajustar el eje Z . . . . .	44
3.14	Tabla iteraciones para ajustar los ejes X Y. Fuente: elaboración propia . .	46
3.15	Resumen de fuerza y momento ejercidos por la fresa.Fuente: Elaboración propia . . . . .	50
3.16	Resumen de resultados análisis por deflexión para eje Y.Fuente: Elaboración propia . . . . .	50
3.17	Resumen de resultados análisis por flexión para eje X en el plano YZ. Fuente: elaboración propia . . . . .	51
3.18	Resultado de prueba de desempeño al operador . . . . .	53

# Lista de símbolos y abreviaciones

## Abreviaciones

CAD	Diseño Asistido por Computadora
CAM	Manufactura Asistida por Computadora
CNC	Control Numérico por Computadora
DCL	Diagrama de Cuerpo Libre
HSS	Acero para Alta Velocidad
IOT	Internet de Las Cosas
MDF	Fibra de Densidad Media
MOSFET	Transistor de Efecto de Campo Metal-Óxido-Semiconductor
MQTT	Transporte de Mensaje Telemétrico mediante Cola
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
RCM	Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad
RPM	Revoluciones por minuto

## Notación general

°C	Grados Celsius
%e	Porcentaje de error
amper	Unidad para medir corriente eléctrica
GPa	Giga Pascales
in	pulgadas
kg	kilogramo
m	metro
mm	milímetro
MPa	Mega Pascales
N	Newton
Nm	Newton metro
volt	Unidad para medir tensión eléctrica



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Entorno del proyecto

El proyecto se desarrollará en la empresa Modelado y Fundición Saborío (MOFUSA), la cual fue fundada por el señor Carlos Saborío Rojas en los años 80 y cuya actividad productiva principal estaba enfocada en la fabricación de moldes y elaboración de productos en fundición de hierro.

En ese momento existían modelistas que se encargaban de hacer los prototipos a mano, por consecuente de una forma muy empírica y artesanal. Al tener el visto bueno del cliente se pasaba a realizar el producto final, pero esto requería de personal específico y de años de práctica. Con el transcurrir del tiempo, este oficio fue perdiendo fuerza porque no había personas dispuestas a dedicarle tanto esfuerzo a este proceso. De acuerdo a uno de los dueños, el último modelista fue un familiar que se jubiló y no se le pidió capacitar a nadie para sustituirlo, por tanto, existió un vacío en ese departamento durante varios años.

El aumento de la producción obligó a buscar una manera de agilizar el proceso de fabricación, la cual debió optimizar los recursos de tiempo y dinero. Se invirtió así, en la fabricación de una mesa router CNC (Control Numérico por Computadora). de tres ejes (X, Y, Z), para elaborar los modelos o prototipos, con la finalidad de darle al cliente una idea sobre el producto solicitado, sin embargo, esta tenía todas las características de un producto *maker* (artesanal). Lo anterior dado que la misma no fue diseñada por una persona con el conocimiento necesario en el ámbito mecatrónico, que emitiera su criterio en cuanto al diseño mecánico, control automático, escogencia de componentes electrónicos, selección de sensores y actuadores e interfaz usuario-máquina. Es decir, no existe armonía entre todas las partes que requiere un óptimo sistema mecatrónico. Como tal esta solución desde su inicio ha presentado una serie de falencias que obliga en algunos casos a finalizar los modelos y prototipos manualmente.

## 1.2 Definición del problema

### 1.2.1 Generalidades

El Gerente de Comercialización y Desarrollo de MOFUSA plantea una serie de inconvenientes que presenta la mesa router CNC que utilizan en la fabricación de modelos y prototipos además de los puntos de mejora que se pudieron observar durante la visita inicial. Entre se destacan a nivel mecánico:

- El diseño de los ejes no consideró el efecto por deflexión.
- Debido a la altura del sistema (60 centímetros), la misma vibra al maquinar piezas superiores a los 25 cm.
- Los soportes de los ejes fueron elaborados en plástico mediante impresión 3D y estos se encuentran fatigados. Cuando deberían ser rodamientos que soporten la exposición a partículas finas y esfuerzos debido a la temperatura. (Ver apéndice A)
- Los motores se encuentran trabados y pierden los pasos debido a la exposición a partículas finas (no funcionan para aplicaciones industriales) y mal posicionamiento de los acoples.
- Actualmente no se conoce la vida útil de todos los componentes, ya que no se hizo un plan de mantenimiento y no se llevó un registro claro de la adquisición de los mismos.
- No se logra maquinar láminas de material Aluminio 6061.
- No se tiene la capacidad para colocar una lámina de más de 1.40 metros de largo. Lo máximo permitido es de 1.20 metros.
- No se alcanza la calidad en cuanto a precisión de los modelos y prototipos, ya que se busca llegar a  $\pm 0.5 \mu\text{m}$  de acabado superficial y que las piezas queden listas para ser entregadas, en su lugar alcanzan  $\pm 0.9 \mu\text{m}$ . Este dato es provisto por el dueño de la empresa, ya que posee un grado de técnico en mecánica de precisión y veinte años de experiencia.
- La máquina actual no permite funcionamiento más de 3 horas al día, durante 5 días a la semana. Se busca que su funcionamiento sea de 6 horas al día, durante 5 días a la semana. En caso de que la demanda de productos los exija.
- Debido a las vibraciones, la máquina no es capaz de elaborar piezas de 5mm de alto (el prototipo o modelo más pequeño que solicita la empresa).

A nivel de control se detectan los siguientes inconvenientes:

- No cuenta con interfaz de usuario, pues en su lugar tiene un monitor de cuatro líneas con un máximo de veinte caracteres cada una (20x4).
- Se obliga al operador a posicionar un cero pieza manualmente.
- No es posible colocar un cero máquina una vez el sistema ha finalizado operación y regresado al cero pieza.

De parte de la gerencia de comercialización y desarrollo, se solicita que el rediseño de la planta se haga fabricando una mesa router CNC nueva.

### 1.2.2 Síntesis del problema

La mesa router automática de tres ejes con la cual cuenta la empresa MOFUSA no es **industrial**, debido a que no cumple con los parámetros mencionados en las generalidades y por ello existe la necesidad de optimizarla con el fin de lograr los estándares que requieren para la fabricación de modelos y prototipos para modelado y fundición.

## 1.3 Justificación del proyecto

En el momento en el que la demanda de productos como placas conmemorativas, con frases (letras) o simplemente geometrías específicas incrementó, se buscó una forma para aumentar el rendimiento del departamento. Al conocer que la elaboración de estos productos dejó de ser un oficio dentro de la empresa, puesto que no contaban con personal que quisiera aprenderlo, se optó por invertir en la adquisición de una máquina que alcanzara reducir tiempo y costos para la fabricación de modelos y prototipos. Pero se necesitaba una opción de implementación rápida, entonces al investigar se encontró la mesa router CNC en dos o tres ejes.

Una persona ajena a la empresa atendió la necesidad pero no contaba con conocimiento en áreas como: diseño mecánico, control automático, elección de componentes electrónicos, sensores, actuadores y estrategias para el mantenimiento de máquinas y mecanismos.

Al efectuar la primera visita a la empresa, dialogar con el encargado de la máquina existente e investigar sobre sus modos de empleo, se detectaron errores como:

- Transmisión de potencia mediante correas, cuando se supone que para esta aplicación se necesita bastante precisión a lo largo del tiempo.
- Movimiento del eje X empleando 2 motores, ante la falta de coordinación podría existir un daño al equipo.
- Movimiento del eje Y empleando 2 motores, ante la falta de coordinación podría existir un daño al equipo.
- Los soportes de los rieles para los carros, elaborados en impresión 3D se encontraban fatigados debido a las vibraciones propias de la máquina. (Ver apéndice A)
- Oxidación y abolladuras en rodamientos y rieles para los carros. (Ver apéndice A)
- Finales de carrera frágiles y en ciertos casos dañados. (Ver apéndice A)
- Operaciones de trayectoria curva con baja precisión, por ejemplo: una circunferencia de cierto radio se convertía en una elipse.
- Interfaz de usuario no ergonómica (LCD 20x4).

El motivo principal del proyecto es desarrollar un centro de mecanizado capaz de manufacturar de forma automática y precisa, piezas, en este caso modelos y prototipos, ya sea para su venta o preparación para que funcione como una plantilla que servirá para generar un molde.

Este equipo busca resolver los inconvenientes en cuanto a rendimiento del departamento de modelos y prototipos para aumentar la productividad y ampliar la gama de productos que puede ofrecer MOFUSA.

## 1.4 Objetivos del proyecto

### 1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un nuevo centro de mecanizado, en el departamento de modelos y prototipos de la empresa Modelado y Fundición Saborío, mediante una mesa router CNC.

### 1.4.2 Objetivos específicos

1. Determinar las variables que serán controladas en el centro de mecanizado CNC de tres ejes, mediante el análisis de sistemas similares existentes.
2. Incorporar interfaz de usuario que permita el control de manera presencial mediante una tarjeta controladora de comunicación por puerto paralelo con interfaz Mach3.
3. Integrar los diferentes componentes y sus respectivos sistemas de control, a través del rediseño del equipo.
4. Formular plan de mantenimiento preventivo, para las variables no automatizables, en función de uso.

## 1.5 Alcance

El diseño mecánico del equipo se efectuará con el propósito de abarcar aspectos como esfuerzos que podrá soportar el armazón, vida útil de los componentes, tolerancias y ajustes que faciliten la construcción de las piezas que estarán involucradas, que al ensamblarlas serán el conjunto mecánico. Para la construcción de la estructura y posible replicación de la misma, a la empresa se le entregarán: plano de conjunto mecánico, lista de componentes estándar y no estándar, planos de cada pieza no estándar y cualquier subconjunto mecánico que lo amerite.

Además, de los planos anteriormente expuestos, se entregarán los diagramas de conexión de los elementos eléctricos o electrónicos en calidad de planos. Estos explicarán las conexiones en los gabinetes de control y potencia.

El siguiente paso será elaborar una lista de materiales para la construcción del equipo que contemple costos de componentes y manufactura, para obtener un presupuesto que será el tope(teórico)de la inversión.

Por último, entregar a la empresa un cuadro comparativo, donde se constatan las ventajas del proyecto sobre otras ofertas, asimismo dotar a la compañía de una herramienta para futuras adquisiciones de este tipo de máquinas.

## 1.6 Limitaciones

Dada la falta de conocimiento de los encargados de la empresa en el ámbito mecatrónico, se tomaron decisiones sin consultar la opinión experta del desarrollador, se apresuró la selección de algunos componentes, ante la falta de experiencia con el manejo de contra-tiempos, se acudió a profesionales para tener guía en el proceso de solución de dichos inconvenientes. A la postre, estos temas derivarán en circunstancias que podrían afectar el rendimiento de la máquina si no se siguen los lineamientos establecidos en el plan de mantenimiento. También se detallan algunas de las razones:

- Construcción de la estructura sin realizar el proceso de diseño mecánico.
- Construcción de las piezas de la estructura sin guías como planos con tolerancias y ajustes.
- Uniones sin criterios teóricos, por ejemplo: colocación de tornillos para fijar los rieles de soporte sin conocer si la cantidad de tornillos será suficiente para soportar la carga.
- Incorporación de nuevas piezas a la estructura, de forma inesperada.
- Atrasos al momento de ensamblar piezas de la estructura.
- Elección de los motores a pasos y motor tipo espiga sin dar espacio al cálculo de fuerzas, momentos, esfuerzos y torques.
- Falta de instrumentación para pruebas a los distintos componentes, por ejemplo: amperímetro de gancho, punta lógica, torquímetro, tacómetro, osciloscopio, fuente de poder, puentes, placa para prototipos, alicate para colocar terminales eléctricas.
- Centro de carga sin señalización para disyuntores y tomas de corriente con malas instalaciones.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1 ¿Qué es un router CNC?

Es esencial dividir la duda en dos ámbitos, el primero por el término router y el segundo por CNC para luego responder la pregunta inicial.

#### 2.1.1 Router

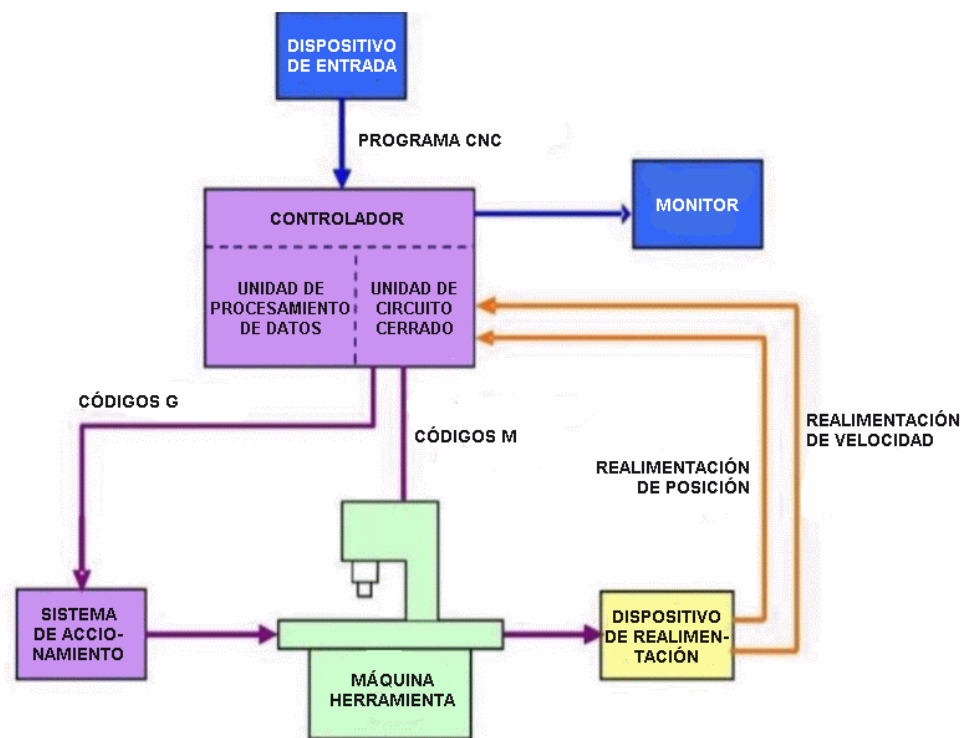
- Router: o bien rebajadora es una herramienta eléctrica manual bastante útil en la carpintería o ebanistería para cortar, grabar y perfilar (las tres más comunes) en madera; también usando la misma broca (o fresa) es común realizar dichas operaciones en otros materiales como acrílico y PCB. [27] [36]. Al cambiar la broca es común efectuar corte, grabado y perfilado en ciertos metales como acero, aluminio, oro y plata. Para propósitos del documento, se dará enfoque al MDF y aluminio 6061
- Materiales para brocas: sin adentrar en los tipos de fresas, se sabe que para aluminio es recomendado usar fresas de acero tungsteno por su dureza y capacidad para manejar la carga térmica ocasionada por el desprendimiento de virutas [19]. Para MDF las fresas HSS o con recubrimiento de nitruro de titanio aluminio son adecuadas. [47]

#### 2.1.2 CNC

El Control Numérico por Computadora, es el uso de una computadora para controlar y monitorear los movimientos de una máquina herramienta [10]. Esta computadora en conjunto con el software se encarga de corregir de manera periódica la posición y velocidad de la herramienta de corte (fresa). Los desplazamientos de la máquina son posibles con la coordinación de actuadores como los servomotores o motores a pasos y sus respectivos controladores (*drivers*).

Los equipos CNC ocupan cinco o seis partes trabajando en armonía para poder funcionar [10]:

- Dispositivo de entrada
- Unidad de control
- Máquina herramienta
- Sistema de accionamiento
- Dispositivos de realimentación (sólo en sistemas con servomotores)
- Monitor



**Figura 2.1:** Diagrama del funcionamiento de una máquina con CNC. Fuente: [10]

### 2.1.3 Router CNC

Al conocer las definiciones por separado se detallará el funcionamiento y elementos que componen un router CNC.

- Tornillo de transmisión: es un actuador lineal encargado de convertir rotación angular en desplazamiento rectilíneo, existen dos conjuntos: tornillos de bolas y tornillos de potencia. Según Mott [32], en los equipos CNC se usan tornillos de bolas por su alta eficiencia, necesidad de menor potencia y par torsional para trasladar cargas, además, de posicionarse con más rapidez y precisión que los tornillos de potencia.

- Rodamientos de bolas: los rodamientos permiten mayor adaptación ante empuje, carga axial y en ciertos casos, pequeños desalineamientos [32], son empleados en los soportes de varillas de transmisión.
- Soportes para tornillos de transmisión y guías con rodamientos de bolas: como se mencionó anteriormente los rodamientos con los que cuentan estos soportes, facilitan el manejo de empuje, carga axial y desalineamiento de las varillas de transmisión.
- Guías para tornillos de transmisión: soportan barras / ejes lineales, sin deslizamiento. Los bloques de soporte de las guías se usan para el apoyo final o intermitente donde las cargas son ligeras y la pequeña desviación del eje no es una preocupación [36].
- Acoplamientos flexibles: transmiten torque de manera uniforme y toleran desalineamientos (radial, angular o axial) [32].
- Fuente de poder conmutada: La fuente de poder conmutada es un transformador de energía que utiliza MOSFET que se encienden y apagan continuamente a frecuencias altas [48]. Actualmente una fuente de poder conmutada es una excelente opción por su eficiencia, ligereza y asequibilidad [6].
- Tarjeta controladora: en el mercado existen variedad de dispositivos electrónicos con capacidad para controlar de forma síncrona los actuadores relacionados con los traslados y el motor empleado para las operaciones de fresado, además, estas tarjetas son compatibles con software destinado a maquinado por CNC. Son interfaces entre la etapa de control y de potencia, en muchos casos usando optoacopladores o relevadores. Estas tarjetas se pueden encontrar en sitios comerciales en línea como Amazon o Ebay con sus especificaciones.
- Actuadores de precisión: Los servomotores o los motores a pasos son las opciones que producirán los traslados coordinados. Los servomotores cuentan con la capacidad para realimentar al software la posición en la que se encuentran debido a que traen incorporado un *encoder*, sensor que convierte el movimiento angular en una señal lógica que puede ser interpretada por un microcontrolador [13], esto permitiría tener un lazo cerrado para desarrollar el sistema de control apropiado. El motor a pasos cumplirá con los traslados coordinados puesto que convierte la cantidad de pulsos eléctricos a la misma cantidad de pasos que generan rotación a su eje [36] pero no tiene capacidad de retroalimentación por tanto se considera un sistema a lazo abierto. Los servos son más caros en comparación a los motores a pasos por su capacidad de retroalimentación y otras propiedades como velocidades máximas mayores, amortiguación de la vibración y operación silenciosa [30].
- Drivers de micro pasos para los actuadores de precisión: Estos dispositivos reciben señales de paso(avance) y dirección desde un microcontrolador y los transforma en señales analógicas que excitan los devanados de los motores para provocar movimiento angular en sus respectivos ejes [36].



Estos drivers son útiles para eliminar excesos al motor y producir suavidad en el movimiento (arranque y operación) [29].

- Motor fresador: conocido como motor espiga o *spindle* es un actuador eléctrico, de carcasa rígida, gira a altas revoluciones, y porta la herramienta de corte (fresa o broca). Para el estudio de esta máquina no se profundizará en los varios tipos de motores. Se centrará en el control de un motor asincrónico trifásico o monofásico de jaula de ardilla, puesto que es el de mayor uso [2].
- Controlador para motor fresador: para este caso se investigará el variador de frecuencia. Son dispositivos electrónicos cuya principal característica es que permite alterar la velocidad y frecuencia de los motores asincrónicos trifásicos o monofásicos.
- Finales de carrera: son elementos mecánicos o electrónicos que proporcionan un método seguro para detener el traslado de la carga por ejes cuando la misma esta por llegar a una posición comprometedor que pueda ocasionar daños a la máquina. Los finales de carrera son sistemas de accionamiento que disparan una señal al microcontrolador y con esto interrumpir el avance de la carga. [36]. Actualmente en sitios web de aficionados [24] se recomiendan los *microswitch* que son de accionamiento mecánico o los interruptores inductivos que su accionamiento se debe a la presencia, (dentro de cierto rango) de un metal, generalmente acero o aluminio [12].
- Software interpretador de código G: existen varios software con interfaces de usuario, capaces de interpretar el código G y convertirlo en geometrías programadas desde un programa CAD.

La investigación se centró en Mach3 de ArtSoft, por ser el más recomendado por usuarios empíricos [24] para maquinado automático. Artsoft resume su aplicación en: "Mach3 posee muchas funciones y proporciona un gran valor para aquellos que necesitan un paquete de software de control CNC. Mach3 funciona en la mayoría de las PC con Windows para controlar el movimiento de los motores (a pasos y servo) mediante el procesamiento de código G (G-Code). Aunque incluye muchas funciones avanzadas, es el software de control CNC más intuitivo disponible. Mach3 es personalizable y se ha utilizado para muchas aplicaciones con numerosos tipos de hardware" [21].

#### 2.1.4 Código G

Este es un tema bastante estudiado y su conocimiento es fácil de adquirir. El código G es un lenguaje para detallar operaciones en equipos que cuentan con CNC, esto se encarga de indicarle al computador mediante coordenadas cartesianas la posición que debe tener la máquina herramienta en un instante dado [33]. Tiene una subdivisión que es el código M que se encarga del desempeño de los motores a pasos por ejemplo su velocidad de avance ante ciertas geometrías. También puede controlar el spindle, energizando e indicando las RPM a las que gira.

## 2.2 Diseño Mecánico

Se investigó en libros que trataran temas de diseño de elementos de máquinas, mecánica de materiales y mecánica vectorial para obtener bases sólidas con las cuales justificar las decisiones tomadas en la sección de la solución.

### 2.2.1 Materiales para el diseño del armazón

Un armazón es una estructura estática totalmente restringida y con al menos un miembro sujeto a más de dos fuerzas [14]. Parte de la filosofía de las lecturas consultadas sobre diseño mecánico [7] y [32], parten de materiales con propiedades básicas, por ejemplo el acero AISI 1020 o el aluminio Al-2014, proceden a los cálculos e iteran hasta obtener los resultados esperados, esto con el objetivo de no incurrir en una sobredimensión innecesaria que podría aumentar los costos.

### 2.2.2 Motores a pasos y tornillos de transmisión

Cuando se trata el tema de los ejes coordenados estos elementos se toman como conjunto y es necesario puesto que los cálculos para dimensionar el par necesario de los motores dependen en gran medida de las propiedades de los tornillos [45].

### 2.2.3 Cadenas Portacables

Aspecto que necesita de atención puesto que es una medida de seguridad para proteger al usuario, posterior a eso, el orden del cableado facilita la intervención de la máquina en caso de fallo o mantenimiento. Se consultó el manual de instalación de la empresa Brenner [38] para tener un mejor panorama sobre el tema.

## 2.3 Sistema Eléctrico

### 2.3.1 Alimentación general

Es importante definir como se le dará energía a todos los dispositivos eléctricos de la máquina. Esto irá de la mano con los requerimientos y especificaciones de quien solicita el desarrollo del proyecto. Basado en esto se escogen todos los componentes eléctricos.

### 2.3.2 Control automático

Aunque no se desarrollara el control automático, se tuvo presente a los autores Dorf [34] y Ogata [20] para poder entender el funcionamiento de los sistemas de control con los que venían ciertos de los componentes adquiridos. Ejemplo de eso es el controlador PID que es ampliamente usado en la industria por su fiabilidad para reducir a cero la diferencia entre una magnitud medido y otra esperada.

### 2.3.3 Protecciones

El proveedor SINGE [41], cuenta con un catálogo de protecciones para equipo eléctrico. Después de conocer las necesidades del equipo se acudirá a su sitio web para investigar si poseen con una protección que cumpliera con las necesidades de la máquina. Entre las que destacan la tensión de alimentación, capacidad de respuesta en el arranque y supresión de sobretensiones. [46]

## 2.4 Presupuesto inicial y propuestas para el centro de mecanizado CNC

Inicialmente se presentó un aproximado del costo calculado para el desarrollo del proyecto. Adicionalmente se investigó precios y características de un equipo proveniente desde la casa matriz en China y otro que se pudiese adquirir en el país mediante la Empresa Capris.

Marca y modelo	Área de trabajo $mm^3$	Precio \$	Garantía en el país
BlueElephant ELE1212	1200x1200x140	5700	No
Proyecto de Graduación	1200x1200x200	7310	Sí
MULTICAM 1-304-R-PF	2000x3000x150	190000	Sí

**Tabla 2.1:** Primera tabla de propuestas para el centro de mecanizado CNC.Fuente: elaboración propia

Potencia $kW$	Par ejes $N.m$	Enfriamiento	Interfaz usuario	Gabinetes
1.5	1.8	Agua	No	Sí
2.2	3	Agua	Sí	Sí
3	5	Aire	Sí	Sí

**Tabla 2.2:** Segunda tabla de propuestas para el centro de mecanizado CNC.Fuente: elaboración propia

Adicional a las características mostradas la máquina *MULTICAM* contó con una serie de atractivos como un dispositivo de cambio automático de herramientas y sus respectivas rutinas de mantenimiento.

Presupuesto		
Cantidad	Nombre	Costo
1	Kit de motores a pasos NEMA 23 y controladores	\$500
1	Interfaz CNC 5 Ejes configurable	\$50
10	Rodamientos	\$250
3	Kit barras estabilizadoras, tornillos de potencia y collarines	\$1500
3	Barras perfil cuadrado de acero estructural	\$150
2	Lámina platinas de acero	\$150
1	Spindle 220V 24000RPM	
1	Variador 220V 2.2kW	\$250
1	Bomba de agua para enfriar motor	\$150
1	Solidworks Premium Package 2018 alquiler de 3 meses	*
1	Arduino UNO	\$30
1	Módulo ESP8622	\$25
1	ESP 8622 Arduino Shield	\$15
3	DRV8825	\$70
1	Computador para Mach3	\$400
3	Fajas plásticas para acarrear cables	\$120
1	Mecanizado de piezas (Mecánico de precisión)	\$1300
1	Remuneración (Servicios profesionales)	\$2100
2	Servicios (agua, electricidad, internet)	++
	<b>Total</b>	<b>\$7310</b>

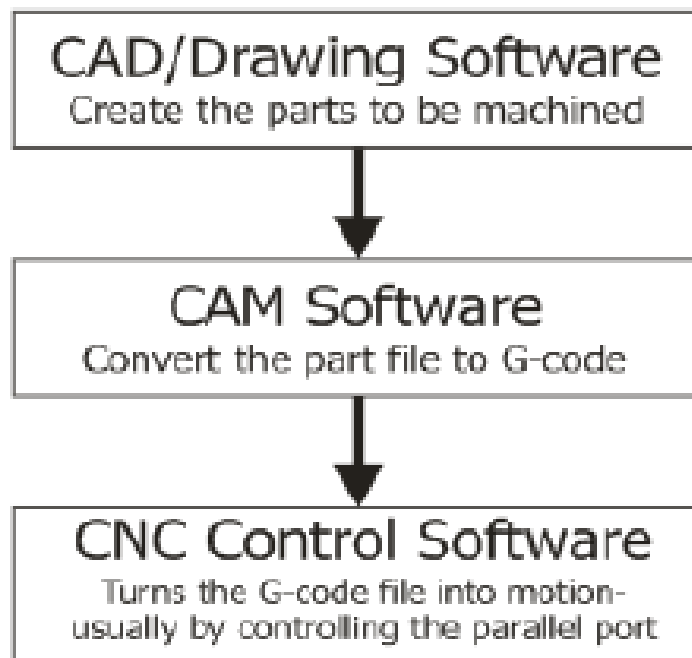
*\*La empresa cuenta con estos activos.*

*++Gastos fijos que tiene la empresa*

**Figura 2.2:** Presupuesto inicial para el desarrollo del centro de mecanizado. Fuente: elaboración propia

## 2.5 Proceso para operaciones por CNC

La figura 2.3 resume el proceso de crear alguna geometría con una máquina con CNC, todo inicia con el software CAD que es donde se modela el contorno, área o sólido buscado y se simulan sus propiedades. Luego se acude a una herramienta CAM que traduce lo que se acaba de modelar a código G y se simulan las operación que se llevarán acabo con la máquina CNC. Finalmente el software de control CNC se encarga de manufacturar la pieza justo como se esperaba, con gran precisión y poco desperdicio [36].



**Figura 2.3:** Diagrama de proceso para operaciones por CNC. Fuente: [36]

## 2.6 Programa de mantenimiento preventivo basado en el RCM

### 2.6.1 Plan de mantenimiento

Documento que presenta una serie de tareas de mantenimiento organizadas en el tiempo para asegurar los niveles de disponibilidad establecidos además, este escrito cambia constantemente debido a que se le debe dar seguimiento y ajustes. [8]

### 2.6.2 RCM

Por sus siglas en inglés *reliability centered maintenance*, es un mantenimiento centrado en la confiabilidad. Es un estudio donde se evalúan probables fallos de un equipo o mecanismos, con el propósito de anticiparse a que sucedan. Esto puede ser ocasionado por alteraciones del equipo o actos personales. [8]

### 2.6.3 Partes del RCM

- Función: incluyen un verbo en infinitivo y un objeto, por ejemplo: "bombear agua". Además, deben tener un parámetro de operación; "bombear agua, a una presión "x" y a un caudal "y". [8]

- Falla funcional: suceden ante el incumplimiento de cierta función, que se espera ocurra con normalidad. [8]
- Modo de falla: son los posibles hechos que desencadenaron la falla funcional. Pueden ser inherentes a la máquina o por acciones de intervención humanas. [8]
- Efectos: se definen como el conjunto de acciones que ocurren ante cada modo de falla. [8]
- Consecuencias: son la serie de hechos provocados por el no respeto de ciertas normas o parámetros establecidos. [8]

Cada modo de falla tiene una acción proactiva que ayuda a prevenir dicho error o bien a corregirlo. Estas acciones proactivas tienen cierto costo debido a la frecuencia y tiempo que toma ejecutarla por el profesional o personal a cargo (con parámetros del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social). Ver apéndice C.1.

# Capítulo 3

## Solución

### 3.1 Determinación de las variables a controlar

Se requiere de un análisis de la mesa router de tres ejes con el fin de determinar su funcionamiento, y establecer cuáles son los mecanismos que deben modificarse para optimizar el desempeño de esta.

El primer paso será levantar una lista de requerimientos para delimitar las acciones que realizará la máquina. Una vez finalizado este paso se procederá a revisar las fichas técnicas e información especializada concerniente a los diferentes componentes y etapas de trabajo que realiza una mesa router, con características similares, para detallar las especificaciones. Por ejemplo, el motor que se empleará como router, su respectivo variador, los motores a pasos y controladores de estos, con el fin de establecer los parámetros óptimos de operación.

Las pruebas de concepto serán maneras de determinar si las variables planteadas se consiguen controlar.

### 3.1.1 Requerimientos

- El sistema de mecanizado Router CNC será un sistema mecatrónico autónomo.
- El sistema de mecanizado Router CNC debe tener tres ejes coordenados.
- El movimiento en cada eje coordenado debe ser lineal.
- El sistema debe contar con tornillos de potencia para la transmisión de energía mecánica.
- El sistema debe tener finales de carrera resistentes al polvo y oxidación.
- El equipo debe tener un sistema de control para manejar los diferentes sensores y actuadores.
- El sistema debe tener un gabinete para almacenar los distintos controladores y fuentes de poder.
- El equipo debe tener aislado el sistema de control del sistema de potencia.
- El sistema debe tener un mando manual fuera del gabinete.
- El mando manual debe contar con un interruptor para manipular la alimentación.
- El mando manual debe contar con un paro de emergencia.
- El mando manual debe contar con paro y arranque.
- El sistema debe operar con un motor tipo espiga.
- El equipo no podrá usarse en exteriores.
- El sistema debe tener una estructura de soporte fabricada con acero y/o aluminio.
- El sistema debe tener un espacio de trabajo de  $1500 \times 1200 \times 200 \text{ mm}^3$  (Largo, ancho, alto).
- Las dimensiones máximas de todo el equipo serán  $2000 \times 1800 \times 2000 \text{ mm}^3$ .
- El equipo no se podrá exponer a entornos donde la salinidad acelere el proceso de oxidación de los componentes.
- El equipo no se podrá exponer a entornos donde exista riesgo de explosión por contacto con gases, incendios y sobrecargas eléctricas.
- El sistema debe operar en un rango de temperatura del medio, que oscile entre los  $18^\circ\text{C}$  y los  $40^\circ\text{C}$ .
- El sistema debe operar donde la humedad relativa no sea mayor al 30%.
- El equipo no podrá accionarse de manera remota, únicamente cuando el operador se encuentre junto al mismo.
- El sistema debe controlarse con una computadora de escritorio que soporte el software Mach3.
- El sistema debe alimentarse a la red eléctrica.
- El sistema debe grabar, cortar y desbastar.
- El sistema debe mecanizar madera, aluminio.
- Las operaciones anteriores no deben superar las 24000 revoluciones por minuto.
- El sistema debe funcionar al menos 6 horas al día por 5 días a la semana.
- El costo del proyecto no debe superar los \$7300.



### 3.1.2 Especificaciones

- El sistema debe alimentarse a tensión de 240 Volts.
- El sistema debe contar con una aplicación para dispositivos móviles para su monitoreo.
- La estructura de soporte del sistema debe fabricarse con acero ASTM A36, acero AISI 1018 o aluminio AA 6061.
- Se deben emplear motores a pasos para el movimiento lineal de los ejes coordenados.
- Los controladores para los motores a pasos deben funcionar con milímetros y pulgadas.
- Los tornillos de potencia deben ser fabricados para trabajar en unidades métricas.
- El control para el sistema será una tarjeta comercial de interfaz Mach3 con capacidad para manejar cinco ejes.
- El software empleado para controlar el sistema de manera presencial será Mach3.
- El motor tipo espiga tendrá un variador de frecuencia comercial para controlar su alimentación y revoluciones por minuto.
- El gabinete debe tener aislante eléctrico para evitar daños en caso de que un cable suelto, toque la superficie del mismo.
- El mando manual debe tener un botón tipo hongo para el paro de emergencia.
- La interfaz de usuario del software debe contar con un mando manual.

### 3.1.3 Variables a controlar

- Cero máquina, velocidad y pasos por revolución en los motores a pasos.
- Frecuencia de operación y enfriamiento para el motor tipo espiga
- En el gabinete se debe controlar la temperatura interna y la alimentación

## 3.2 Componentes

Se recuerda que la adquisición de los componentes fue anticipada al proceso anteriormente detallado. En la sección de solución se explica la validación de los mismos con cálculos o referencias a las fichas técnicas.

Tomando en cuenta que se buscó una inversión que involucrara componentes robustos para la aplicación pero no onerosos y además, compatibles con el software, se acude a los siguientes elementos:

### 3.2.1 Fuentes de poder

La eficiencia de las fuentes conmutadas oscila entre 68% y 90% [6] además que a nivel comercial son asequibles y fácil de encontrar. Estos 2 criterios fueron aplicados para su adquisición.

- Fuente de poder conmutada modelo S-400-36. Alimentación 220 VAC, salida en corriente directa 36 Volts y 11 Ampers. Esta fuente se empleará para entregarle poder exclusivamente a los *Microstep Motor Driver*, con el propósito de evitarle ruido a dichos dispositivos para que trabajen de manera óptima.
- Fuente de poder conmutada modelo Quans 60W5A. Alimentación 220 VAC, salida en corriente directa 12 Volts y 5 Ampers. Esta fuente se empleará para entregarle poder a los sensores usados, interruptores inductivos o eventuales microcontroladores.

### 3.2.2 Actuadores

- Motor tipo espiga trifásico Huanyang HY02D223B. Al hacer referencia a los requerimientos y especificaciones del sistema. El tiempo continuo de operación supera las cinco horas, razón para usar enfriamiento forzado, en este caso por agua y así prolongar la utilidad del motor. La capacidad para girar a 24000 revoluciones por minuto da posibilidad de maquinar AA 6061 y MDF. También se solicitó que el sistema se alimentara a 220 Volts.
- Motores a pasos NEMA 23 modelo 23HS2430B. Se deberá considerar el efecto de la inercia y los rozamientos de la carga para dimensionar la velocidad máxima de arranque y frenado del motor sin pérdida de pasos. Estos valores se estimarán y se ajustarán experimentalmente. [29]
- Tornillos de bolas ejes X, Y, Z. Se buscó obtener una máquina precisa que no necesitara de tanto ajuste para evitar perder pasos mientras se efectuaran las operaciones de maquinado. El autor Mott en su libro *Diseño de Elementos de Máquinas* [32] mencionó que estos actuadores lineales poseen 90% de eficiencia y por lo general no son autoasegurantes debido a la baja fricción entre la tuerca y el tornillo. No obstante se contó con la propiedad de aplicar la carga sobre la tuerca, porque la

sostiene el motor a pasos se encuentra apagado y al encender el motor a pasos, su eje se traba automáticamente lo cual se transmite por el acople e impide una "tuerca loca". Los ejes X,Y poseen una longitud de 1500mm, diámetro exterior de 16mm y un paso de 4.23mm. El eje Z posee una longitud de 300mm, diámetro exterior de 12mm y un paso de 3.63mm.

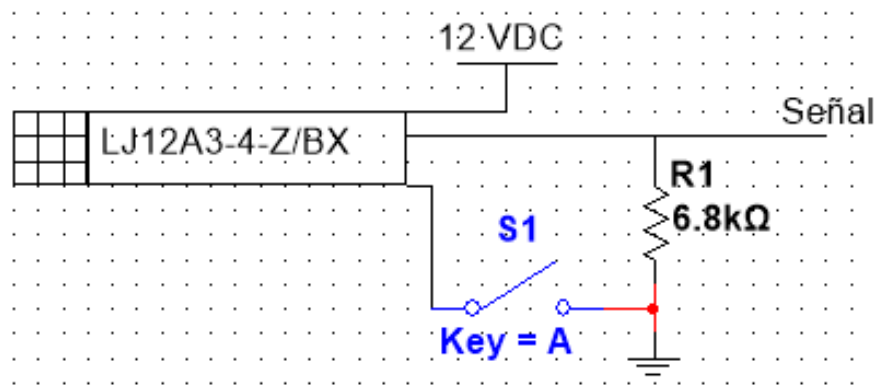
- Bomba de agua de 75W. Capaz de levantar una columna de 3.2 metros a un caudal de 3200L/h (litros por hora). El fabricante recomienda que la bomba quede completamente inmersa en agua y mangueras de poliuretano de diámetro interno 5mm y diámetro externo 8mm para el transporte del fluido.

### 3.2.3 Controladores

- Variador de frecuencia Huanyang HY02D223B. Alimentación a 220VAC. potencia máxima de 2.2KW. Ajuste de la frecuencia de 0 a 400 Hz. Capacidad para manejar un motor de 24000 rpm y 10 Ampers [15]
- Controlador de micro pasos modelo CW5045. Alimentación en corriente directa de 50 Volts y 4.5 Ampers. Se buscó el movimiento con la mayor suavidad posible y mejorar la precisión de los motores se usó el método de excitación por micro pasos o bien sea los *Microstepping Motor Driver* porque controlan el valor de la intensidad que circula por cada devanado [29]. Estos se encargaron de aumentar la cantidad de pasos por revolución con los que cuenta el motor en su condición de fábrica (200 por revolución). La precisión efectiva dependerá del tornillo de potencia que se usará para la transmisión. [22]
- Tarjeta para interfaz Mach3 de 5 ejes. Diseñada para controladores de micropasos para motores a pasos bipolares. Se controlada desde el software mediante el puerto de comunicación paralelo y se alimenta vía USB. Todas las señales se encuentran aisladas por optoacopladores. [9]
- Módulo WiFi ESP8266. Dispositivo de bajo consumo(10  $\mu$ A - 170mA y 5V), 17 pines de entrada/salida y un ADC con resolución de hasta 1024. [35]

### 3.2.4 Sensores

- Interruptores inductivos como finales de carrera LJ12A3-4-Z/BX. Se consultó la ficha técnica para extraer la información específica que se necesitó para el desarrollo de esta parte[12]. Se considera que son una mejor opción al compararse con un interruptores electromecánicos por su resistencia al polvo y al no existir contacto, no serán sometidos a esfuerzos que acorten su vida útil. Para la comunicación entre la placa controladora cuya tensión lógica es de 5 Volts y los interruptores a 12 Volt, se hizo un circuito de adaptación para los interruptores inductivos.Figura 3.1.



**Figura 3.1:** Circuito de adaptación para interruptor inductivo. Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Sistema de control automático

Tras varias consultas a profesionales en el tema y las diferentes fichas técnicas, se decide que el sistema no amerita desarrollo de un control automático, puesto que los distintos componentes cuenta con uno, acá se descarta hacer un modelo empírico, mientras el modelo teórico se podría tomar en cuenta para fines informativos. Este criterio se separará en dos ámbitos:

1. El motor tipo espiga o *spindle* cuenta con un variador de frecuencia y el fabricante recomienda no alterar los valores del PID.
2. El sistema de transmisión de potencia mecánica o el conjunto de motores a pasos y tornillos de bolas son un sistema a lazo abierto, por tanto no existe realimentación. En este caso los motores a pasos tendrían los *microstep driver* conectados a una tarjeta controladora, esta misma ligada al computador que guarda la posición de los motores mediante software que también tiene valores recomendados en su PID.

Esto reduce el diagrama de operación de la máquina a conocer el empleo mediante el software.

Sin embargo, se procede a levantar una lista de requerimientos, especificaciones y verificar las variables anteriormente planteadas, definir las salidas que serán controladas. La implementación del sistema de control automático requiere asegurar que el router y la transmisión de potencia funcionen de forma sincronizada, es decir que la fresa gire y avance a velocidades nominales y constantes para los diversos materiales. Lo esperado es que el equipo, necesitará menos revoluciones para maquinar otros materiales más blandos que el aluminio y esto debe ser posible desde el control y no modificando manualmente los parámetros del router.

Además, que los motores a pasos se muevan de manera coordinada y proporcional a las dimensiones de la pieza a tratar, con el fin de disminuir los desperdicios de material y tiempo perdido por motivos de retrocesos en la producción.

Un sistema de posicionamiento de coordenadas cartesianas para que el router se ubique donde corresponde y que no omita pasos al momento de efectuar una operación determinada, para así evitar desperfectos en la pieza y proteger la herramienta.

Para reducir costos se propone un controlador con elementos no onerosos, pero lo suficientemente robusto para operar de forma eficiente en un ambiente con polvo, calor y vibraciones mecánicas propias de la máquina.

### 3.3.1 Requerimientos

- El sistema de mecanizado Router CNC será un sistema mecatrónico autónomo.
- El sistema de mecanizado Router CNC debe tener tres ejes coordinados.
- El movimiento en cada eje coordinado debe ser lineal.
- El sistema debe contar con tornillos de potencia para la transmisión de energía mecánica.
- El equipo debe tener un sistema de control para manejar los diferentes sensores y actuadores.
- El sistema debe tener un gabinete para almacenar los distintos controladores y fuentes de poder.
- El equipo debe tener aislado el sistema de control del sistema de potencia.
- El sistema debe tener un mando manual fuera del gabinete.
- El mando manual debe contar con un interruptor para manipular la alimentación.
- El mando manual debe contar con un paro de emergencia.
- El mando manual debe contar con paro y arranque.
- El sistema debe operar con un motor tipo espiga.
- El sistema debe operar en un rango de temperatura del medio, que oscile entre los 18 °C y los 40 °C.
- El sistema debe operar donde la humedad relativa no sea mayor al 30%.
- El equipo no podrá accionarse de manera remota, únicamente cuando el operador se encuentre junto al mismo.
- El sistema debe controlarse con una computadora de escritorio que soporte el software Mach3.
- El sistema debe alimentarse a la red eléctrica.
- El sistema debe grabar, cortar y desbastar.
- El sistema debe mecanizar madera, aluminio.
- Las operaciones anteriores no deben superar las 24000 revoluciones por minuto
- El sistema debe funcionar al menos 6 horas al día por 5 días a la semana

### 3.3.2 Especificaciones

- El sistema debe alimentarse a tensión de 240 Volts.
- Se deben emplear motores a pasos para el movimiento lineal de los ejes coordinados.
- Los controladores para los motores a pasos deben funcionar con milímetros y pul-

gadas.

- Los tornillos de potencia deben ser fabricados para trabajar en unidades métricas.
- El control para el sistema será una tarjeta comercial de interfaz Mach3 con capacidad para manejar cinco ejes.
- El software empleado para controlar el sistema de manera presencial será Mach3.
- El motor tipo espiga tendrá un variador de frecuencia comercial para controlar su alimentación y revoluciones por minuto.
- El gabinete debe tener aislante eléctrico para evitar daños en caso de que un cable suelto, toque la superficie del mismo.
- El mando manual debe tener un botón tipo hongo para el paro de emergencia.
- La interfaz de usuario del software debe contar con un mando manual.

### 3.3.3 Entradas

- Alimentación dentro de un rango para conseguir los 240 Volts.
- Corriente entregada por los controladores de los motores a pasos.
- Parámetros propios del variador de frecuencia bajo recomendación del fabricante.
- Parámetros del software para ajustar velocidad de los motores.
- Diseños en código G.

### 3.3.4 Salidas

- Frecuencia de operación o revoluciones por minuto de la máquina.
- Movimiento de los motores a pasos para conseguir una ubicación.

Para conseguir un sistema robusto y que no fuese oneroso, se buscaron elementos recomendados por usuarios del software empleado, para la interfaz de usuario, entonces se hizo adquisición de un kit(encontrado a nivel comercial) para el desarrollo de fresadoras, tornos y mesas router automáticas. Los mismos tienen fichas técnicas incompletas, empíricas o no oficiales. Razón por la cual, las pruebas de concepto fueron indispensables. Como se mencionó anteriormente, la tarjeta controladora de 5 ejes y el variador de frecuencia cuentan con sus propios reguladores o compensadores y para evitar mal funcionamiento se respetan los valores predeterminados.

### 3.3.5 Tarjeta Controladora

Tarjeta controladora de 5 ejes con interfaz Mach3, como se muestra en la figura 3.2. Primero se necesitó leer el manual de usuario provisto por el vendedor para configurar todos los parámetros posibles. Este controlador alimenta por USB y se comunica por puerto paralelo DB25 o "puerto de impresora" con una computadora que tenga el software Mach3 instalado en ella, se partió del hecho de que la computadora destinada a la prueba ya contaba con el software. Para verificar el funcionamiento de la misma se efectuó la

siguiente prueba de concepto:

- Detección de la tarjeta mediante el software. En esta prueba se supo que había conexión cuando en el programa se asignaba una velocidad al *spindle* (recuadro amarillo figura 3.3), se presionaba el botón *Spindle CW F5* (recuadro rojo figura 3.3) y el relevador de la tarjeta se accionaba (recuadro rojo figura 3.4).

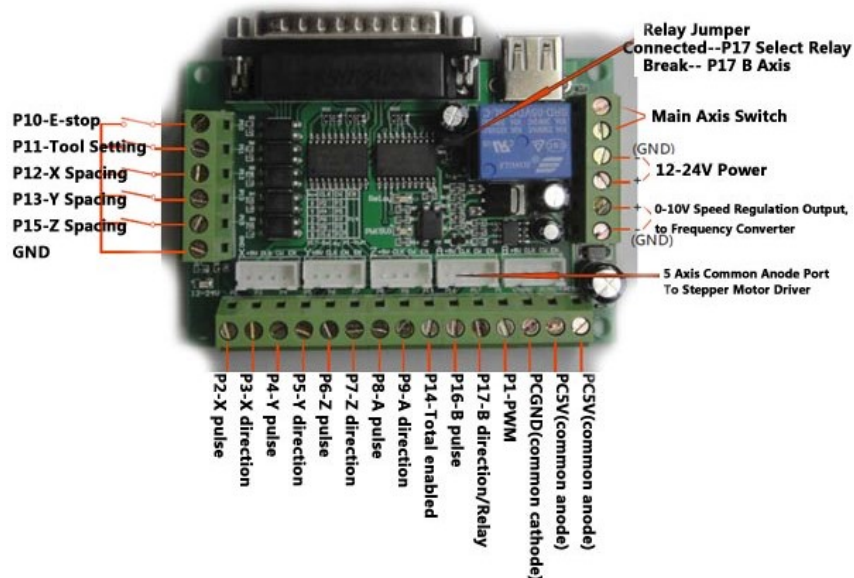


Figura 3.2: Tarjeta controladora de 5 ejes con interfaz Mach3. Fuente: [11]

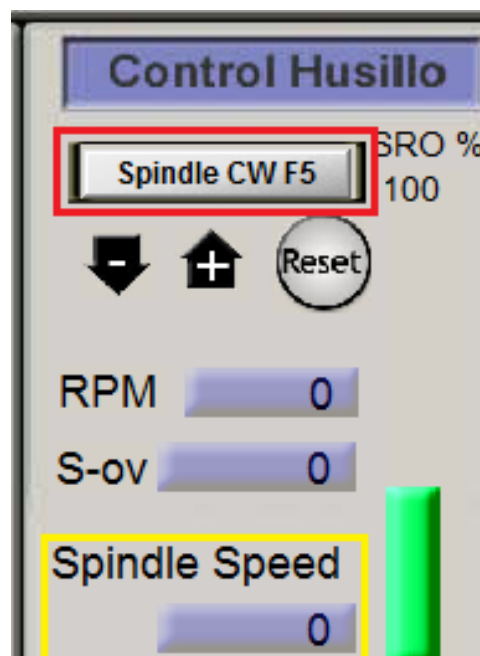
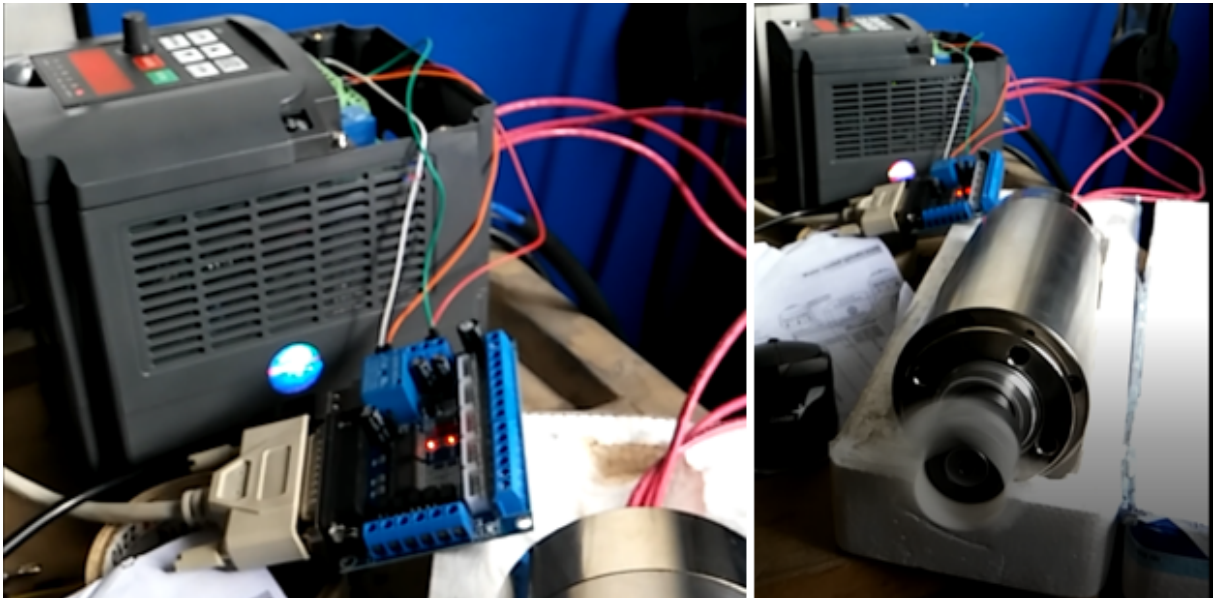


Figura 3.3: Botón de accionamiento para el *spindle* en Mach3. Fuente: elaboración propia



**Figura 3.4:** Ampliación de tarjeta controladora de 5 ejes con interfaz Mach3. Fuente: elaboración propia

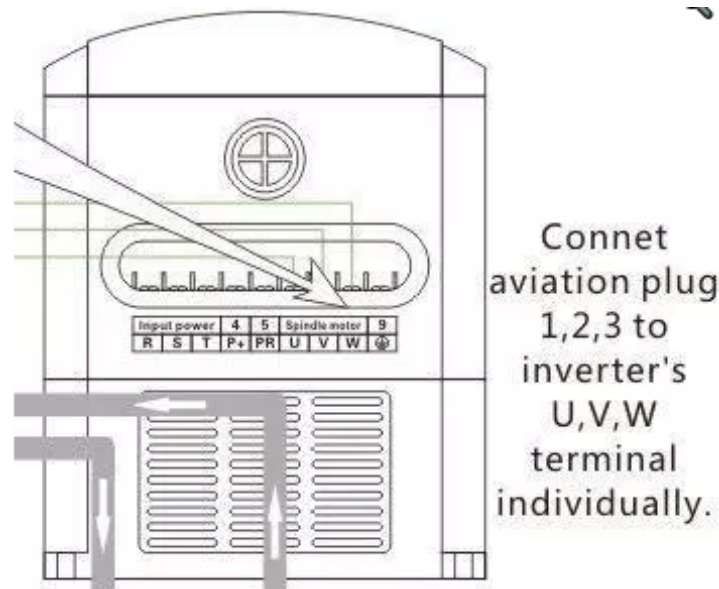


**Figura 3.5:** Prueba de concepto en ejecución. Fuente: elaboración propia



### 3.3.6 Variador de frecuencia

Primero se necesitó leer el manual de usuario provisto por el fabricante [15] para cumplir con las conexiones acorde a cada prueba y configurar todos los parámetros posibles. Se realizaron varias pruebas de concepto. Para la validación de las diferentes pruebas se emplearon dos criterios: utilizar relación lineal con la escala de frecuencia del variador (0 a 400 Hz) y empleo de un tacómetro de bajo costo. Ambas documentadas con sus respectivos detalles y resultados.



**Figura 3.6:** Indicación sobre conexión entre *spindle* y variador Fuente: [15]

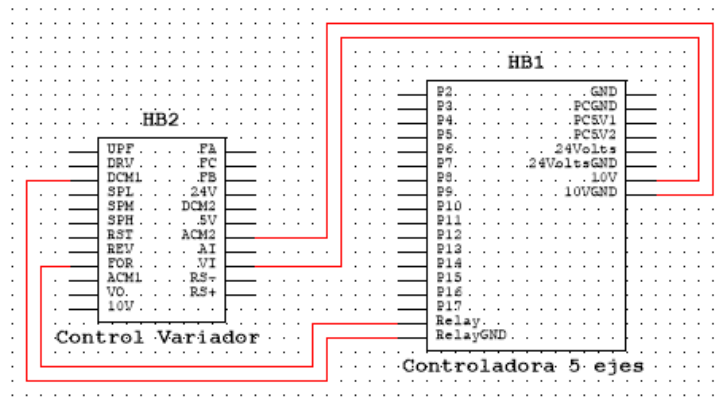
<i>Spindle</i>	Variador
1	U
2	V
3	W

**Tabla 3.1:** Resumen de conexión entre *spindle* y variador. Fuente: elaboración propia

Tarjeta Controladora	Variador de frecuencia
Relay(-)	DCM
Relay(+)	FOR
GND	VI
0-10V(OUT)	ACM

**Tabla 3.2:** Resumen de conexiones Variador de frecuencia y tarjeta controladora. Fuente: elaboración propia

1. Utilizar la escala de frecuencia del variador (0 a 400 Hz) 3.8. Para encontrar la velocidad de giro se aplicó una relación lineal entre tres valores para conocer el



**Figura 3.7:** Conexión entre variador y tarjeta controladora. Fuente: elaboración propia

valor deseado. 3.1. La prueba inicial, consistió en poner a girar el *spindle* a 13800 RPM desde Mach3 en cinco ocasiones distintas (resultados de la tabla 3.3). Esto debía arrojar un valor aproximado de 230 Hz, tal como se demostró en la ecuación 3.1.

$$\begin{aligned}
 \frac{24000}{400} &= \frac{13800}{f} \\
 &= f = \frac{13800 * 400}{24000} \\
 &= 230Hz
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

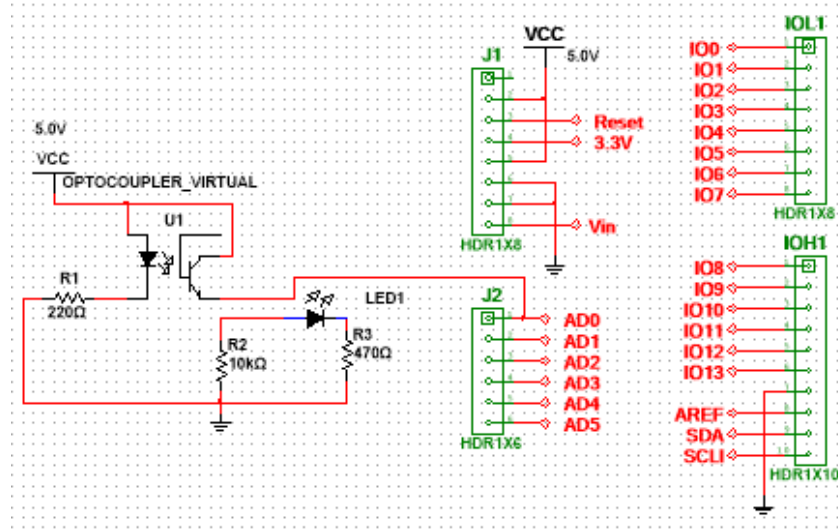
Iteración	Lectura(Hz)
1	231.2
2	230.6
3	230.2
4	230.5
5	231.0

**Tabla 3.3:** Resultados de las mediciones para las pruebas ante las revoluciones del *spindle*. Fuente: elaboración propia



**Figura 3.8:** Prueba de concepto al variador empleando la escala de frecuencia. Fuente: elaboración propia

2. Empleo de un tacómetro de bajo costo para medir las RPM del *spindle* al momento de su operación. Se diseñó este instrumento empleando un sensor óptico infrarrojo TCRT5000 [39], un arduino UNO, un diodo LED, una resistencia de  $220\ \Omega$ , una resistencia de  $470\ \Omega$  y una resistencia de  $10\ \text{k}\Omega$ . Todos los materiales en la siguiente configuración (figura 3.9):

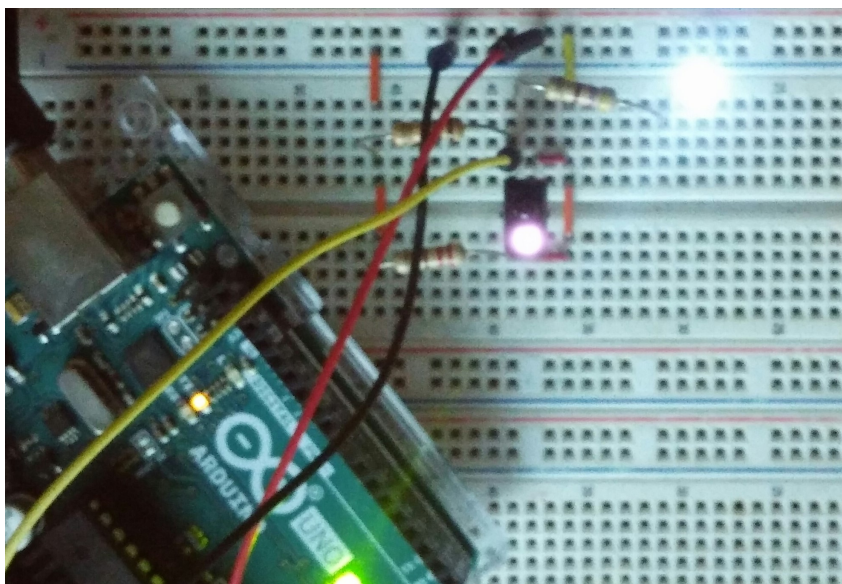


**Figura 3.9:** Circuito del tacómetro de bajo costo. Fuente: elaboración propia

El propósito del led fue para captar el instante en el cual el arduino tuviese una lectura. Para generar las lecturas se colocó una pieza al eje del *spindle* que funcionaría como aspas para que provocara interrupción al sensor óptico y este arrojaría una señal al microcontrolador. Por conveniencia se implementó un elemento de interrupción de dos aspas. Como el TCRT5000 contaba con una distancia máxima de percepción de 15 milímetros se colocó el circuito a dicha distancia perpendicular a las aspas. Se programó al arduino para que captara y desplegara las lecturas con un período de muestreo de 998 ms.

Iteración	Lectura(RPM) $\pm 5\%$
1	13118
2	13125
3	13116
4	13130
5	13108

**Tabla 3.4:** Resultados de las mediciones para las pruebas ante las revoluciones del *spindle*. Fuente: elaboración propia



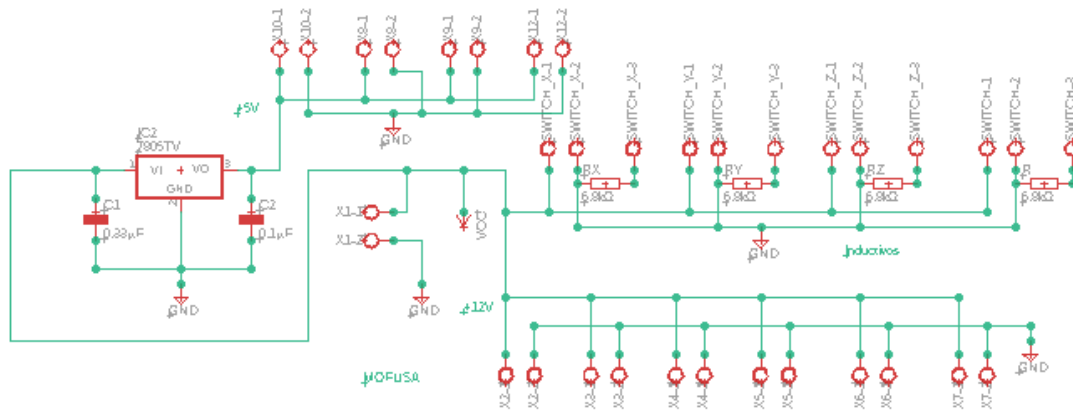
**Figura 3.10:** Prueba de concepto al variador empleando el tacómetro de bajo costo. Fuente: elaboración propia

### 3.3.7 Circuito de adaptación entre sensores y tarjeta controladora

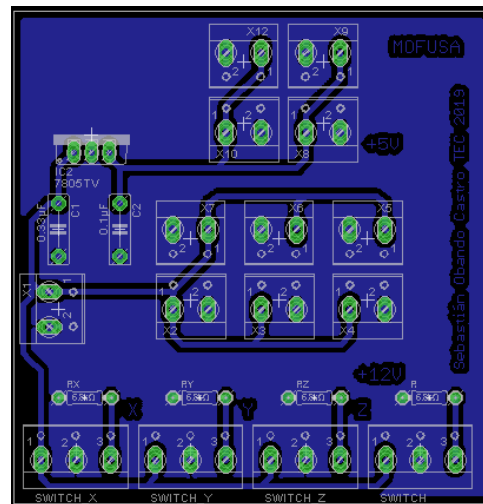
Se toma la decisión de emplear fuentes de energía individuales para cada etapa con la finalidad de evitar daños a los elementos de control o sobrecargar la fuente en la etapa de potencia, debido a que en la ficha técnica, el autor recomienda no sobrepasar el 85%. [43] Para la etapa de control se usó una fuente de 12 Volts 5 Ampers porque la mayoría de componentes se alimentaban a esa tensión. Al presentarse la diferencia entre la tensión lógica de la tarjeta controladora (5 Volts) y la señal de los interruptores inductivos se diseñó una tarjeta para su comunicación y para alimentar posibles componentes a 5 Volts. De forma empírica se encontró que una resistencia de  $6.8k\Omega$  era suficiente para reducir la tensión a la 5 Volts y comunicarse con la tarjeta controladora. Una vez resuelto ese problema se procedió a crear el esquema de conexión (figura 3.11) y luego la propuesta para PCB (figura 3.12). Posteriormente se acudió al laboratorio de circuitos impresos de la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para conseguir la PCB mostrada en la figura 3.13. Cabe destacar que se le añadió tomas de 5 Volts en caso de necesitar energía para sensores con esa magnitud de alimentación.

### 3.3.8 Interruptores inductivos como finales de carrera

Estos interruptores se implementaron para funcionar como el punto "Home" o bien punto de verificación y cero máquina más no como cero pieza. Para que su funcionamiento respondiera como garantía en caso que los finales de carrera programados fallaran. Se resume la conexión entre los interruptores y la tarjeta controladora en de la siguiente manera: como primer paso se necesitó unir el PC5V con el GND que se encontraba al



**Figura 3.11:** Esquema de conexión del circuito de adaptación entre sensores y tarjeta controladora. Fuente: elaboración propia



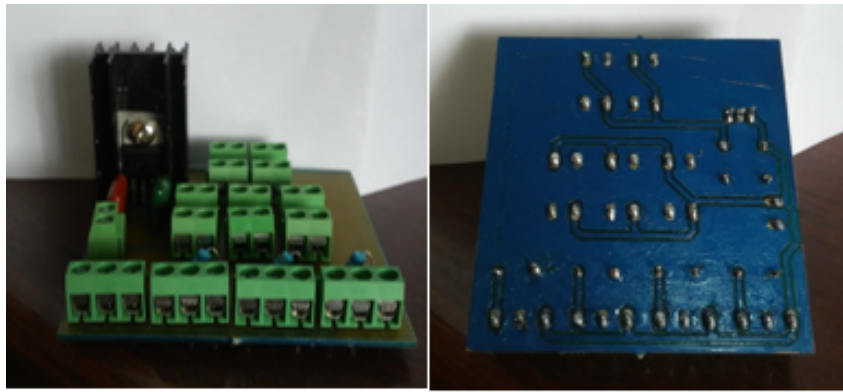
**Figura 3.12:** Circuito de adaptación entre sensores y tarjeta controladora. Fuente: Elaboración propia

lado del P15. Los tres interruptores debían tener su GND (cable azul) a PCGND de la tarjeta controladora, estas referencias debían estar unidas a la referencia de la fuente de 12 Volts que se usó para alimentarlos(cable café) y la señal(cable negro). P12-Interruptor eje X, P13-Interruptor eje Y. P15-Interruptor eje Z.

### 3.3.9 Controladores de micropasos

Los motores a pasos traían consigo los *drivers* recomendados por el proveedor. En la ficha técnica encontrada, se recomendó no alimentar los motores(mediante el *driver*) a más de 2.7 Ampers para evitar la convección forzada [22], con el propósito de extender la vida útil del controlador. Entonces se decidió colocar los interruptores en la configuración mostrada en la tabla 3.5:





**Figura 3.13:** PCB del circuito de adaptación entre sensores y tarjeta controladora. Fuente: elaboración propia

SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6	SW7	SW8
OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON

**Tabla 3.5:** Configuración del controlador por micro pasos.

Resumiendo la tabla 3.5 se indica que el *driver* entregará 2 Ampers al motor a pasos, y aumentará diez veces la cantidad de pasos por vuelta. También, se siguió el procedimiento para la configuración de aumento por cinco veces la cantidad de pasos por defecto.

## 3.4 Validación de los motores a pasos y sus respectivos controladores

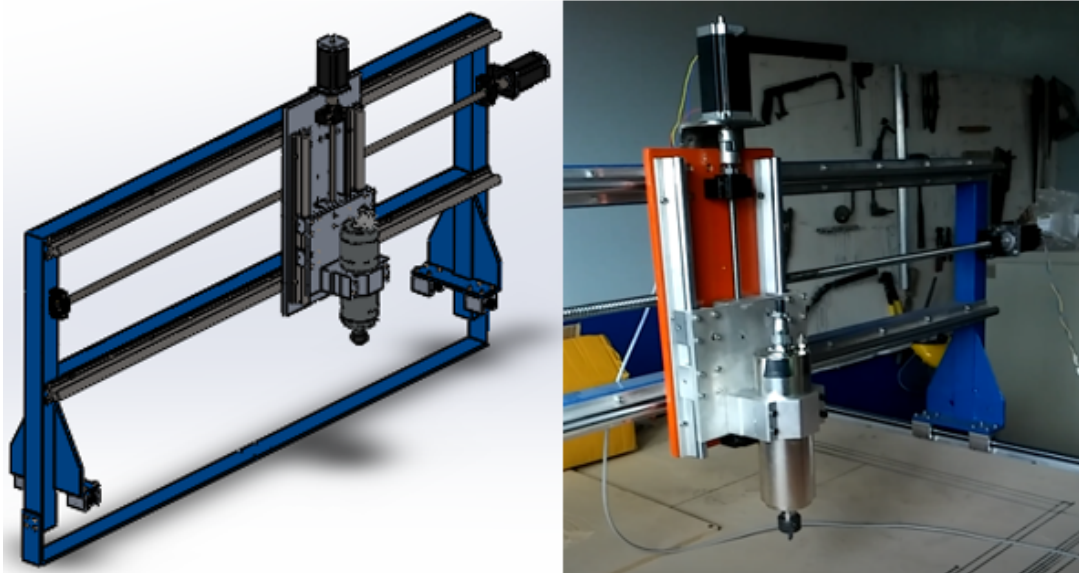
Anteriormente se comentó, que la adquisición de los motores se hizo antes de los cálculos. Dadas las condiciones se optó por validar su atingencia para la aplicación.

### 3.4.1 Determinación del torque

Cabe aclarar que la masa de los componentes se obtuvo de los sitios web donde se adquirieron los componentes, simulaciones y las fichas técnicas disponibles.

Se empleó una herramienta disponible en línea [25] para el cálculo del par necesario con la intención de desplazar la carga del eje Y, de 54.5 kg (esto según los vendedores del equipo). Previendo que las estimaciones de la masa fuese imprecisa, la carga anterior se sobredimensionó a 65 kg, la razón de esto fue que al obtener la masa mediante simulaciones dio como resultado 61 kg (ver figura 3.15). Se buscó mover la carga con el tornillo de bolas de 16mm de diámetro, paso efectivo de  $4.23 \pm 0.05$  mm y longitud efectiva de  $1100 \pm 0.5$  mm, inercia del rotor del motor a pasos de  $0.0612 \cdot 10^{-3}$  kg\*m<sup>2</sup> (obtenida de la ficha técnica de un motor similar [18]), desplazamientos medios de 400mm por acciona-

miento(sobredimensionado) y tiempo de estabilización de 0.9s. Se obtuvo que el torque necesario para mover el peso esperado era de 2.83 N.m. (Ver apéndice E, figuras E.4, E.5, E.6)



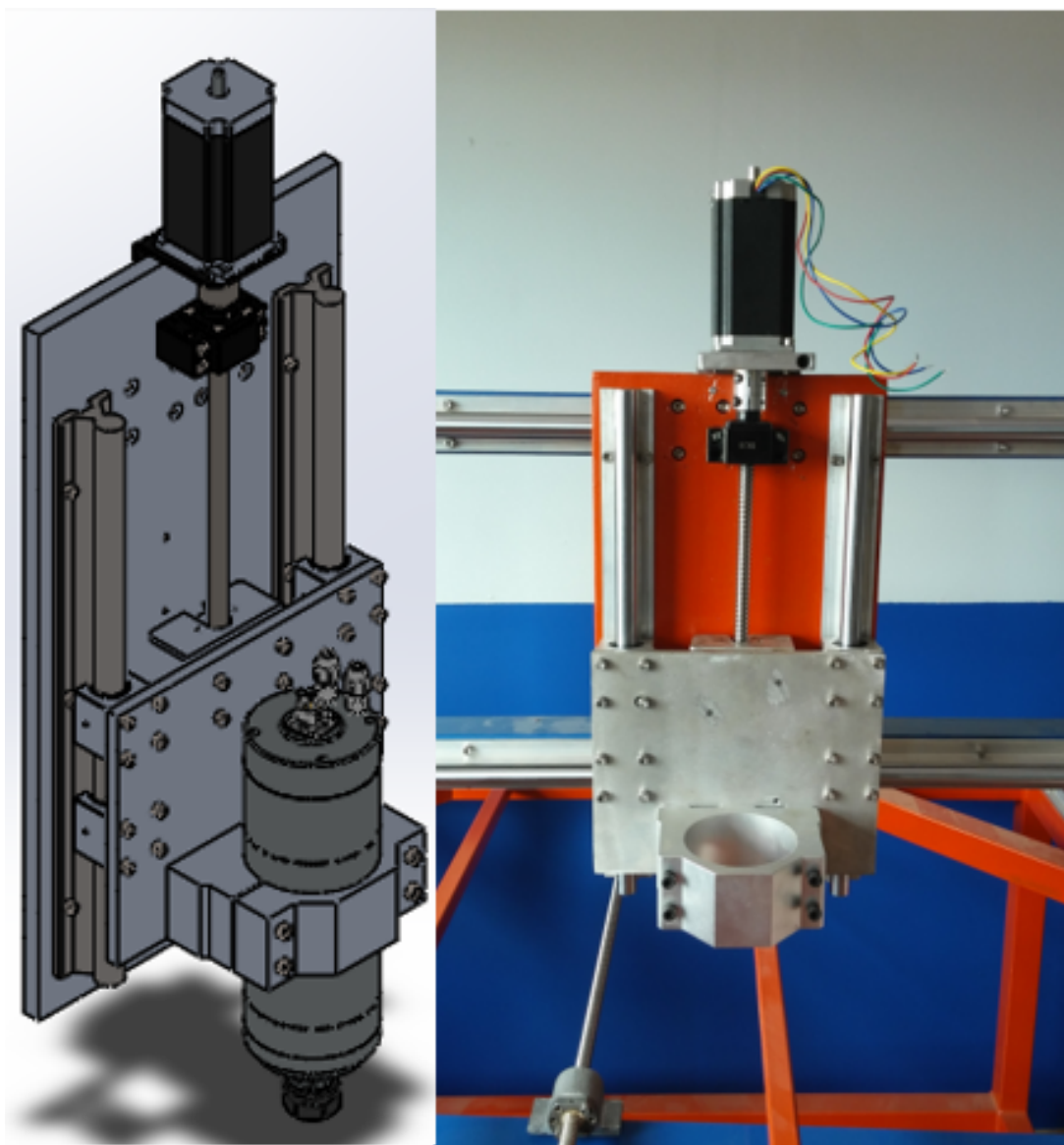
**Figura 3.14:** Imagen ilustrativa del modelado del carro y el equipo real. Fuente: elaboración propia

<b>Propiedades de masa de componentes seleccionados</b>	
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --	
El centro de masa y los momentos de inercia son los resultados en el sistema de coordenada	
* Incluye las propiedades físicas de uno o más componentes/sólidos ocultos.	
Masa = 61132.84 gramos	
Volumen = 10783077.39 milímetros cúbicos	
Área de superficie = 3931144.65 milímetros cuadrados	
Centro de masa: ( milímetros )	
X =	1130.75
Y =	2504.13
Z =	1111.98

**Figura 3.15:** Simulación de la masa de la carga del eje Y. Fuente: SolidWorks 2016

El eje X debía trasladar una carga de 18.16 kg (esto según los vendedores del equipo) y para su análisis se sobredimensionó a 25 kg, la razón de esto fue que al obtener la masa mediante simulaciones dio como resultado 22 kg (ver figura 3.17). Se buscó mover la carga con el tornillo de bolas de 16mm de diámetro, paso efectivo de  $4.23 \pm 0.05$  mm y longitud efectiva de  $1100 \pm 0.5$  mm, inercia del rotor del motor a pasos de  $0.0612 \times 10^{-3}$  kg\*m<sup>2</sup> (obtenida de la ficha técnica de un motor similar [18]), desplazamientos medios de 400mm por accionamiento(sobredimensionado) y tiempo de estabilización de 0.9s. Resultando en un torque necesario de 2.65 N.m (Ver apéndice E, figuras E.1, E.2, E.3)





**Figura 3.16:** Imagen ilustrativa del modelado del conjunto soportado por el eje X y su versión real. Fuente: elaboración propia

Por otra parte el eje Z desplazaba una carga de 16.03 kg (esto según los vendedores del equipo) y se sobredimensionó a 25 kg, la razón de esto fue que al obtener la masa mediante simulaciones dio como resultado 12 kg (ver figura 3.19) entonces se decide tener un criterio con el peor de los escenarios. Se buscó mover la carga con un tornillo de bolas de 12mm de diámetro, paso efectivo de  $3.63 \pm 0.05$  mm y longitud efectiva de  $150 \pm 0.5$  mm, inercia del rotor del motor a pasos de  $0.0612 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , desplazamientos medios de 30mm por accionamiento (sobredimensionado), tiempo de estabilización de 0.9s. Estas especificaciones requerían de un motor con un par de de 1.5 N.m. (Ver apéndice E, figuras E.7, E.8, E.9)

Propiedades de masa de componentes seleccionados  
 Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

El centro de masa y los momentos de inercia son los resultados en el sistema de coordenada  
 \* Incluye las propiedades físicas de uno o más componentes/sólidos ocultos.

Masa = 22435.30 gramos

Volumen = 4985402.16 milímetros cúbicos

Área de superficie = 1091783.20 milímetros cuadrados

Centro de masa: ( milímetros )  
 X = 1204.87  
 Y = 2520.78  
 Z = 1046.34

**Figura 3.17:** Simulación de la masa de la carga del eje X. Fuente: SolidWorks 2016

### 3.4.2 Pruebas de concepto

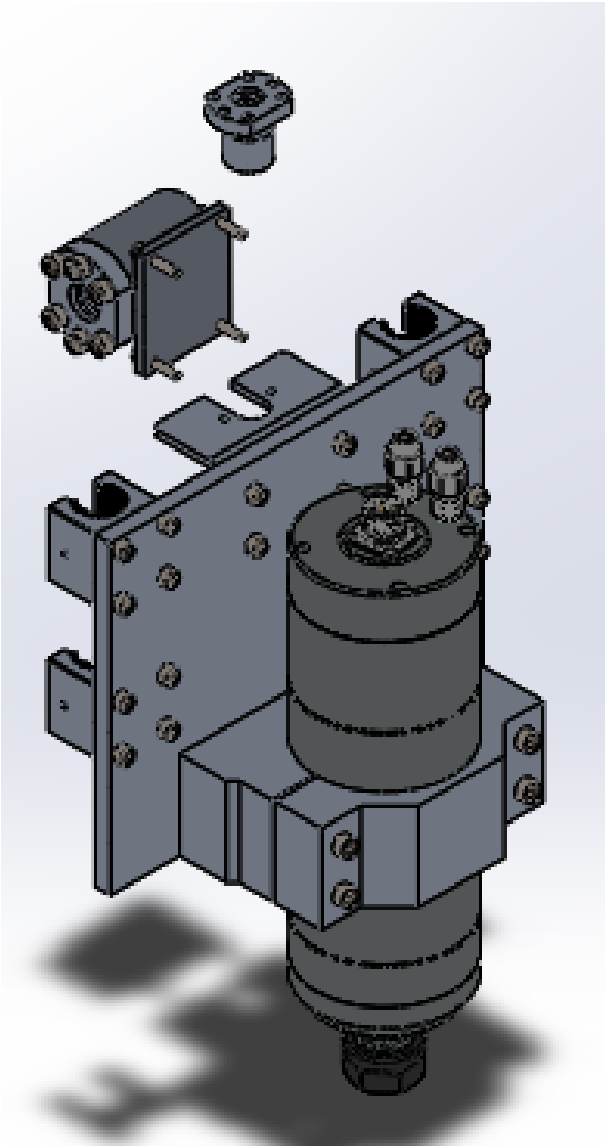
Se estudió una ficha técnica de un motor similar. El fabricante brinda los siguientes datos que se encuentran en uno de los sitios web comerciales [31]: A+ cable rojo, A- cable verde, B+ cable amarillo, B- cable azul. Corriente máxima 3 Amperes, 36 Volts, máximas rpm 3000. Torque máximo 3Nm.

- Accionar un motor a pasos sin carga usando el integrado L298N y un Arduino UNO. Considerando la simplicidad de la prueba el microcontrolador se encargaría de enviar los pulsos al doble puente H(L298N) para mover el motor a voluntad. Al arduino se le programó en un bucle para que hiciera girar al motor por cinco segundos en sentido horario, se detuviese un segundo y girara cinco segundos en sentido antihorario. Se muestra una conexión similar a la real, en las figuras 3.20 y 3.21. No obstante, en las tablas 3.6 y 3.7 se adjunta el detalle de las conexiones usadas entre todos los componentes, las relaciones se leen por filas. Se aclara que el arduino se alimentó con una PC(por USB) y el L298N con una fuente de poder de 12 Volts. Esto consistió en simple observación y la prueba obtuvo el resultado esperado.

Arduino(Pines)	L298N(Entradas)
11	In1
9	In3
10	In2
8	In4

**Tabla 3.6:** Resumen de conexiones entre L298N y Arduino. Fuente: elaboración propia

- Accionar un motor a pasos sin carga usando el CW5045 y un Arduino UNO. Esta prueba fue similar a la anterior, pero se sustituyó el L298N por un CW5045 (Mi-



**Figura 3.18:** Modelado del conjunto soportado por el eje Z. Fuente: elaboración propia

L298N(Salidas)	23hs2430b
Out1	Rojo
Out3	Verde
Out2	Amarillo
Out4	Azul

**Tabla 3.7:** Resumen de conexiones entre L298N y motor a pasos. Fuente: Elaboración propia

*crostep driver*) y la fuente de 12 Volts por una de 36 Volts. Se muestra una conexión similar a la real, en la figura 3.22. No obstante, en las tablas 3.8 y 3.9 se adjunta el detalle de las conexiones usadas entre todos los componentes, las relaciones se leen por filas. Esto consistió en simple observación y la prueba obtuvo el resultado

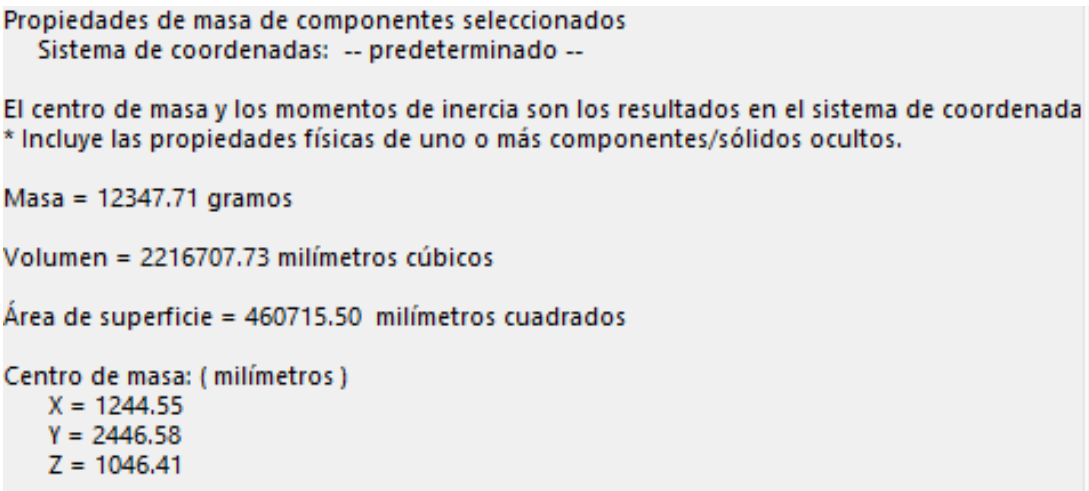


Figura 3.19: Simulación de la masa de la carga del eje Z. Fuente: SolidWorks 2016

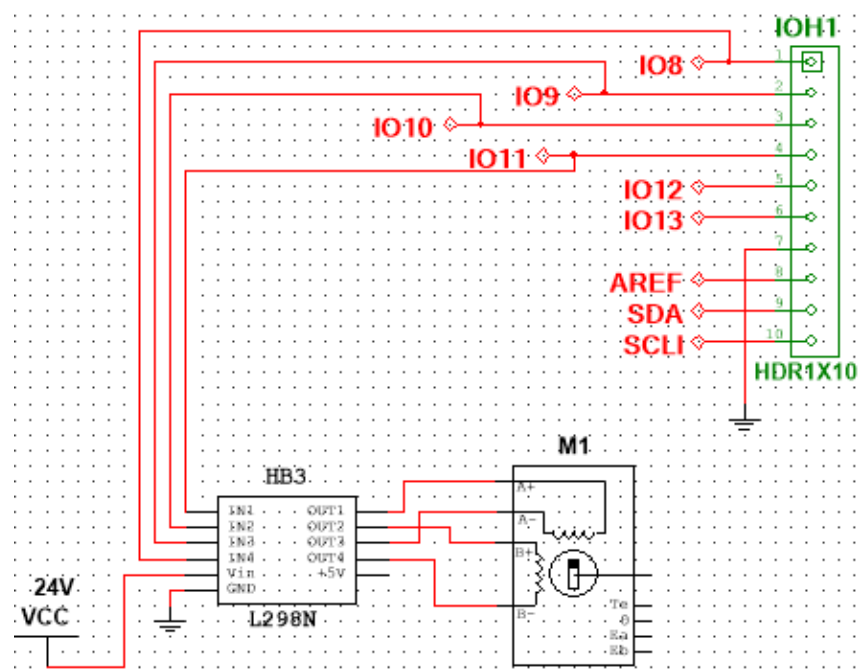
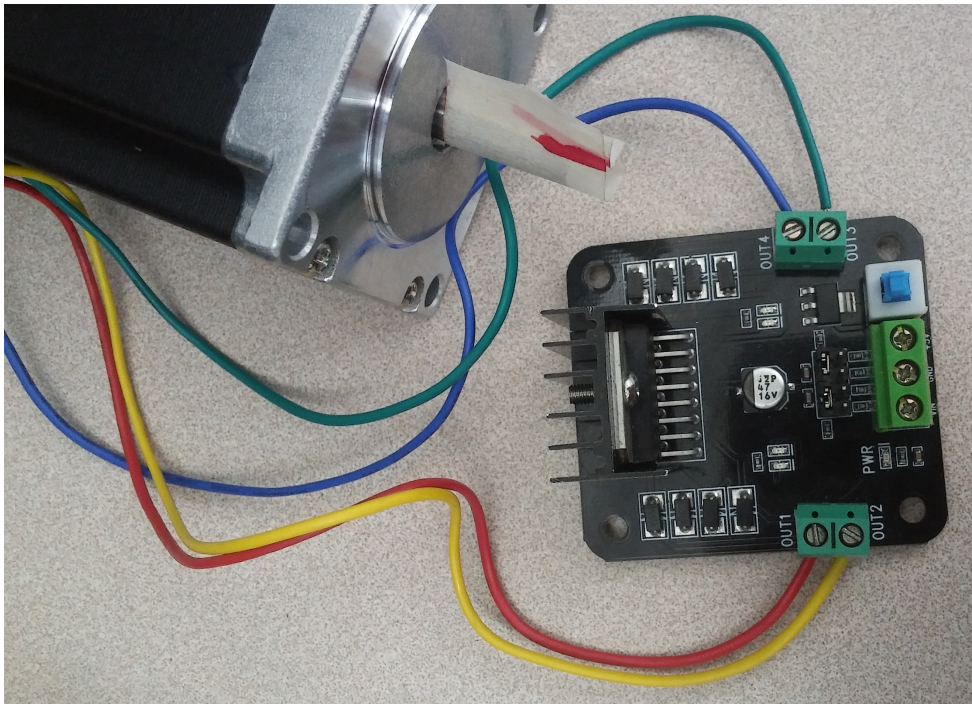


Figura 3.20: Diagrama de conexión entre integrado L298N, Arduino y motor a pasos. Fuente: elaboración propia

esperado.

Arduino(Pines)	CW5045(Entradas)
8	EN-
9	DIR-
10	PUL-
5V	EN+,DIR+,PUL+

Tabla 3.8: Resumen de conexiones entre CW5045 y Arduino. Fuente: elaboración propia

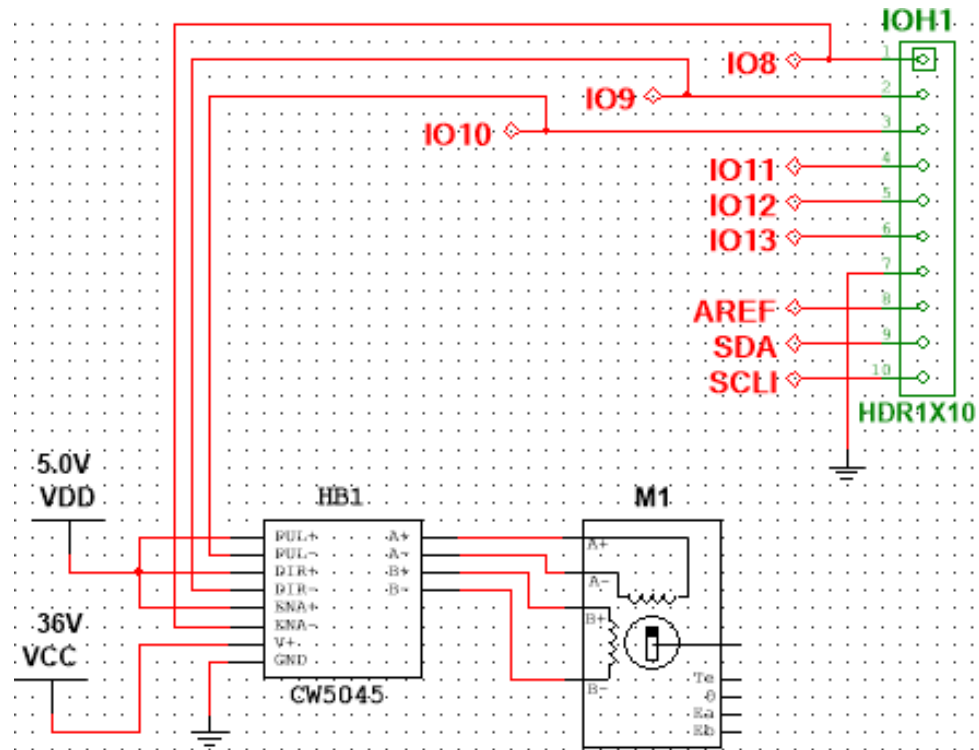


**Figura 3.21:** Imagen de conexión entre integrado L298N y motor a pasos. Fuente: elaboración propia

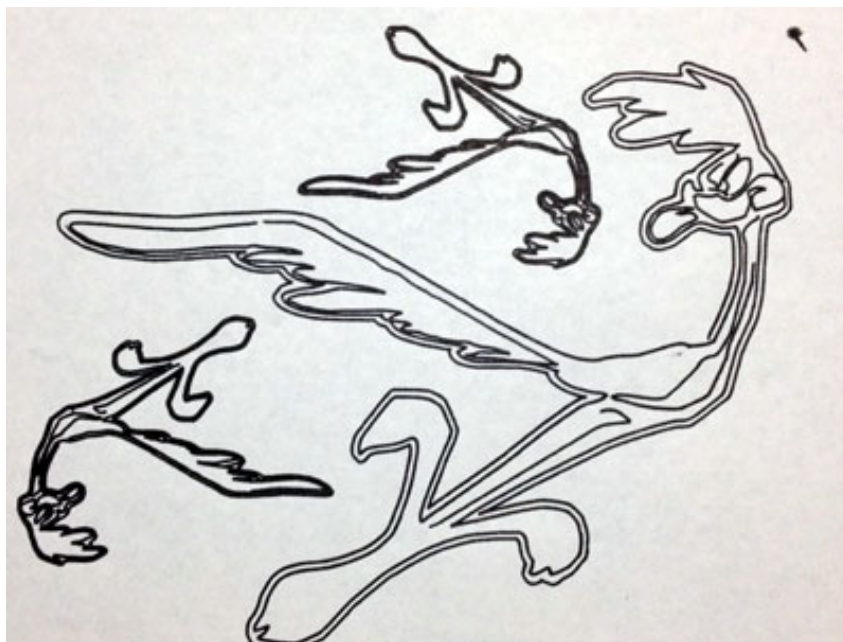
CW5045(Salidas)	23hs2430b
A+	Rojo
A-	Verde
B+	Amarillo
B-	Azul

**Tabla 3.9:** Resumen de conexiones entre CW5045 y motor a pasos. Fuente: elaboración propia

- Accionar un motor a pasos sin carga usando la tarjeta controladora de 5 ejes con interfaz para Mach3 y un driver CW5045. Esta prueba fue similar a la anterior, pero se sustituyó el Arduino por la Tarjeta controladora. Esto consistió en simple observación y la prueba obtuvo el resultado esperado. Se muestra una conexión similar a la real, en la figura 3.26. No obstante, en la tabla 3.10 y 3.9 se adjunta el detalle de las conexiones usadas entre todos los componentes, las relaciones se leen por filas. La prueba se ejecutó corriendo un programa de ejemplo con el que cuenta el software y luce parecida a la figura 3.23. Además, se muestra la conexión física entre los tres componentes(figura 3.24)

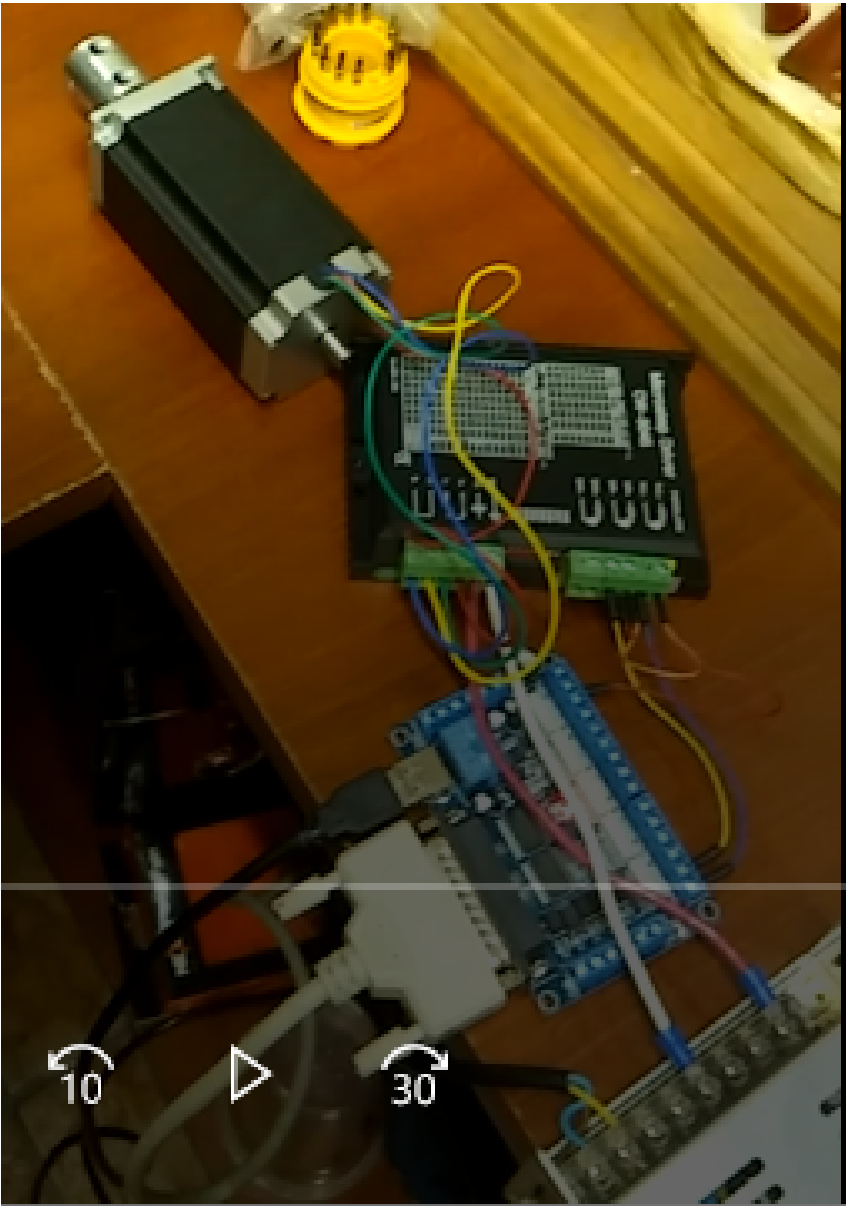


**Figura 3.22:** Diagrama de conexión entre driver CW5045, Arduino y motor a pasos. Fuente: elaboración propia



**Figura 3.23:** Imagen de contorno ejecutado según el código G de ejemplo. Fuente: [5]





**Figura 3.24:** Imagen de conexión entre driver CW5045, tarjeta controladora y motor a pasos.  
Fuente: elaboración propia

Tarjeta Controladora	CW5045(Entradas)
N/C	EN-
P3	DIR-
P2	PUL-
PC5V	DIR+,PUL+

**Tabla 3.10:** Resumen de conexiones entre CW5045 y tarjeta controladora. Fuente: elaboración propia

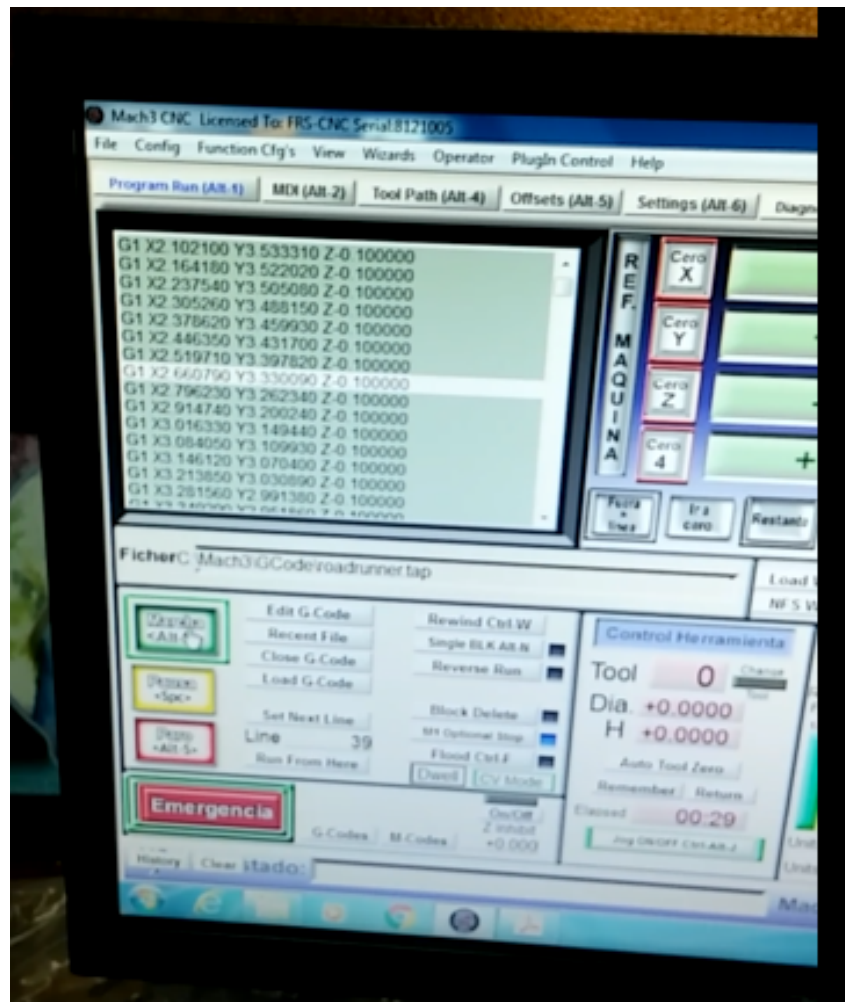
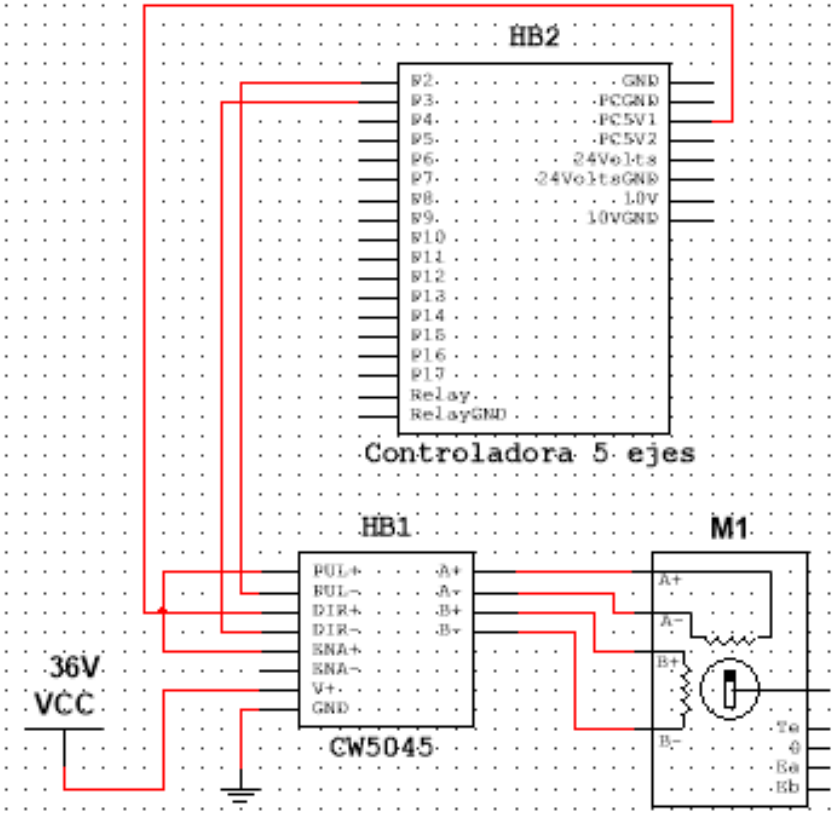
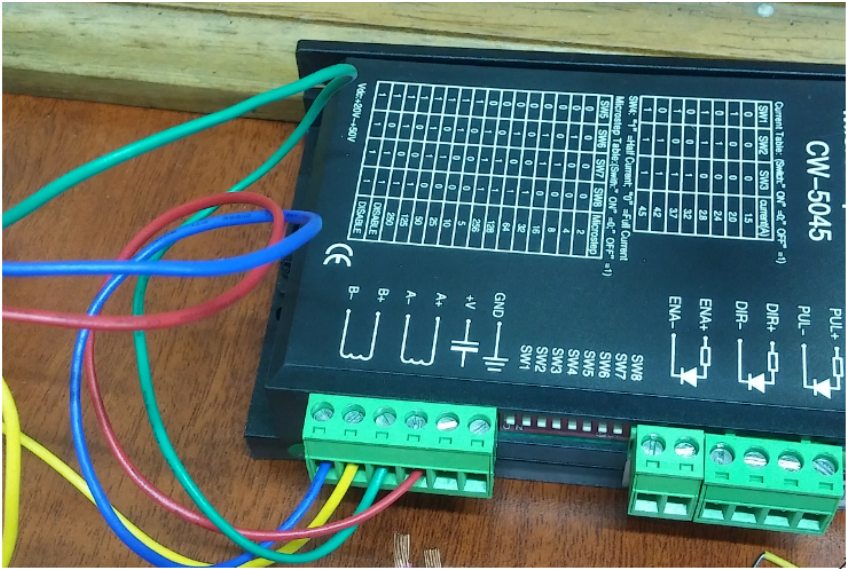


Figura 3.25: Captura de pantalla de programa en Código G. Fuente: elaboración propia





**Figura 3.26:** Diagrama de conexión entre driver CW5045, tarjeta controladora y motor a pasos.  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.27:** Conexión entre driver CW5045 y motor a pasos. Fuente: elaboración propia

- Acoplar un motor a pasos al tornillo de bolas cuando se tenga la estructura con todos los componentes ensamblados y accionarlo para corroborar que soportará la carga. Se decidió probar con el eje Y porque era el que necesitaba soportar mayor carga(sostenía a los ejes X y Z). Se usó un acople elastómero marca Lovejoy (figura 3.28) ante fallos [17] para sustituir el existente (figura 3.29). Los acoples que venían con los tornillos fallaron como se aprecia en la figura 3.29



**Figura 3.28:** Acople elastómero. Fuente: [37]



**Figura 3.29:** Fallo de acople original. Fuente: Elaboración propia

El criterio de elección para el acople se basó en el manual de la compañía Lovejoy [17], que describía una serie de pasos para coincidir con la aplicación deseada. Se debía aportar el torque y velocidad nominales del actuador en cuestión (3N.m y 3000 rpm) además, el tipo de material que soportará los esfuerzos a compresión y el material que soportará los esfuerzos a tensión. Finalmente se consiguió un acople LC50 porque aguantaría un par máximo de 6 N.m.

Se realizaron varios ensayos de manera empírica, probando distintas magnitudes de las posibles configuraciones de los controladores y valorando los intereses de la empresa. El manual de Mach3 facilita las fórmulas para los cálculos de las cantidad de pasos efectivos por revolución cuando se invoca un *micro step driver*, sin embargo se muestran en la figura 3.30

Al introducir el valor de los pasos por revolución, las magnitudes de velocidad y aceleración se ajustaron automáticamente. Estos valores fueron suficientes para no percibir vibración excesiva o "cabeceo" en el carro.

```

1in = 25.4mm
Hilos por pulgada 6 (Ejes X, Y)|
Pasos por revolución MPP 200
Grados por paso 1.8

-----

Ejes X, Y
Paso efectivo del tornillo (1in(25.4mm)/Hilos por pulgada) 25.4/6 = 4.23

Micropasos 10
Grados efectivos (Cw/Micropasos) 1.8/10 = 0.18
Pasos por revolución (Pasos por revolución MPP*micropasos) 200*10=2000
Pasos por revolución (vuelta completa*Grados efectivos) 360/0.18 = 2000
Pasos por unidad (Pasos por revolución/Paso efectivo del tornillo) 2000/4.23 = 472.81

```

**Figura 3.30:** Fórmulas para el cálculo de pasos efectivos por revolución. Fuente: elaboración propia

Micro pasos	Pasos por revolución	Velocidad $mm/min$	aceleración $mm/s^2$
5	236.41	300	12
10	472.81	4500	90
25	1182.03	460	120
50	2364.07	466	150

**Tabla 3.11:** Resumen de resultados para ejes X Y. Fuente: elaboración propia

Micro pasos	Pasos por revolución	Velocidad $mm/min$	aceleración $mm/s^2$
5	264.55	150	5
10	550.96	250	80
25	1377.41	268	95
50	2754.82	275	110

**Tabla 3.12:** Resumen de resultados para ejes Z. Fuente: elaboración propia

### 3.5 Calibración de los ejes coordenados mediante herramienta de software controlador

- Eje Z. Se usó un compás de precisión para medir diámetros internos y comparar lecturas del software con las de un calibre. El compás se usó por la dificultad para medir con un calibre desde la bancada hasta la fresa. Entonces se abrió el compás hasta que una las puntas hiciera contacto con la fresa y el otro extremo con la bancada. Esa apertura se midió con un calibre para replicar el procedimiento de la prueba anterior.

Cada medición hecha con el calibre se verificó tres veces y con calculadora en mano se obtuvo un promedio.

Para finalizar con la calibración del eje Z se le ordenó a la máquina subir 20mm y arrojó el siguiente dato que se muestra en la figura 3.33



**Figura 3.31:** Imagen del compás de precisión utilizado para trasladar medidas. Fuente: elaboración propia

Iteración	Dist teórica <i>mm</i>	Dist recorrida ( $\pm 0.05$ )mm	%e	Pasos por revolución
1	35	33.90	3.2	523.021
2	35	34.56	1.27	506.583
3	35	34.95	0.14	500.215

**Tabla 3.13:** Tabla iteraciones para ajustar el eje Z

Esto se tradujo en que el eje Z poseía una precisión de  $0.0006 \text{ mm} \pm 0.14\%$ .

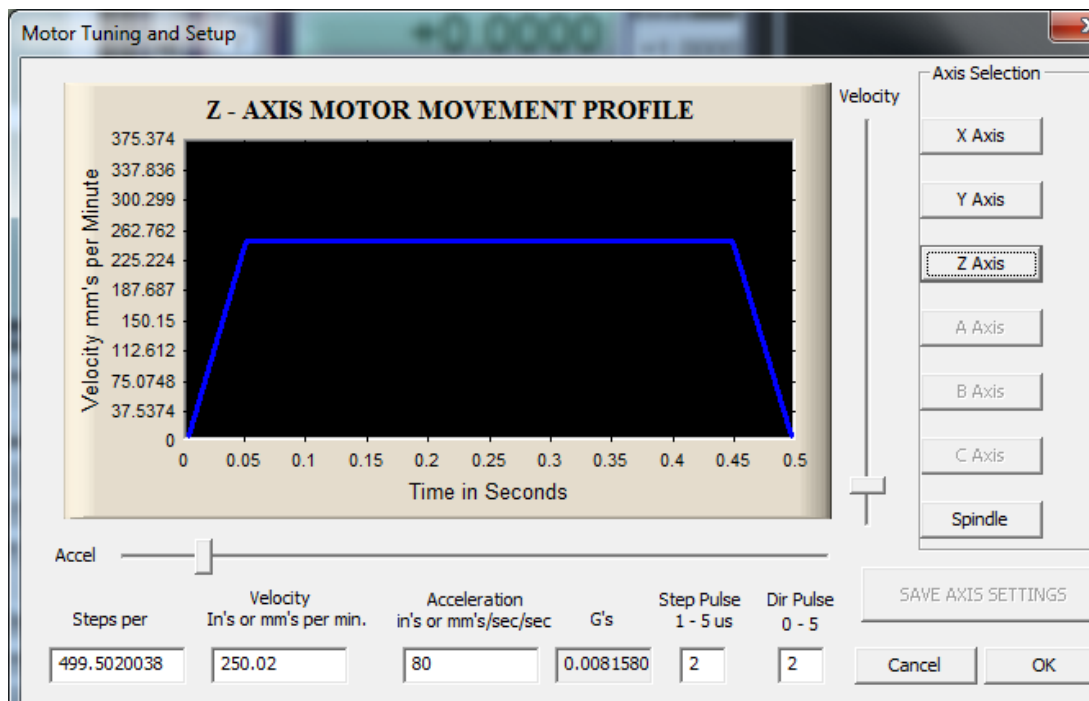


Figura 3.32: Último valor arrojado por la herramienta de calibración. Fuente: Mach3

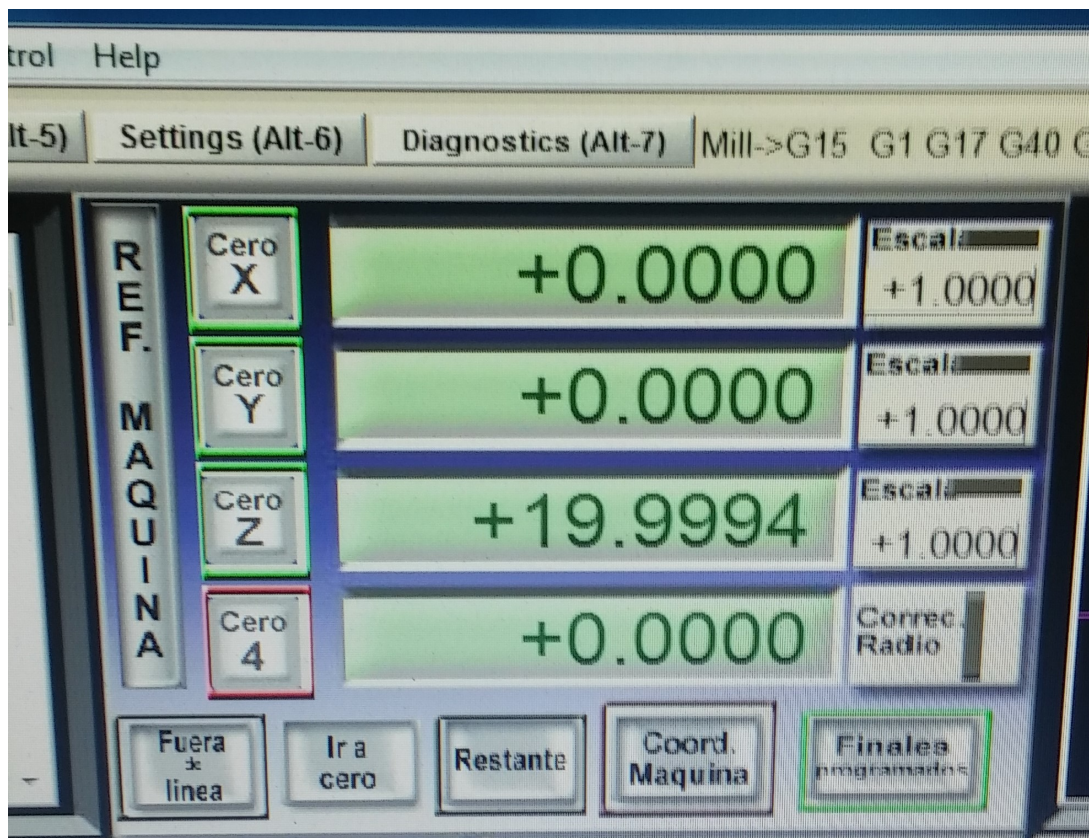
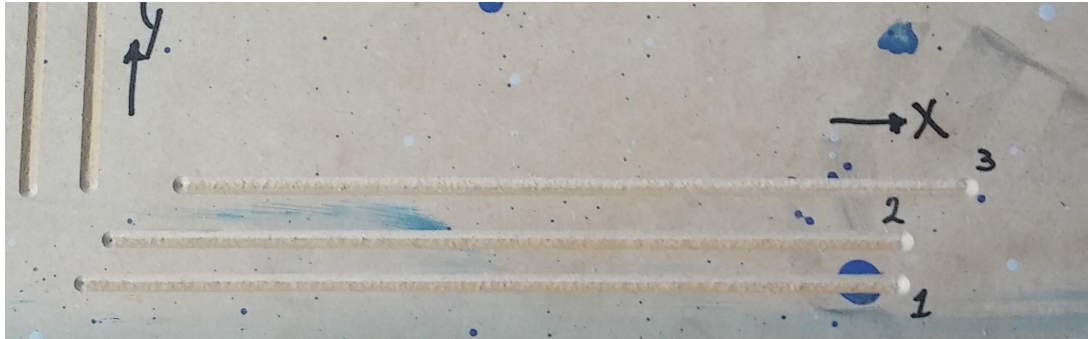


Figura 3.33: Prueba de calibración eje Z. Fuente: Mach3



- Ejes X y Y. Para esto se puso el *spindle* a operar con una fresa recta de un milímetro de diámetro. Se introdujo la fresa en el material a cortar (figura 3.34) y se ejecutó la opción de auto ajuste. El primer dato solicitado fue distancia por recorrer, al terminar solicitaba la distancia real recorrida, esto hacía el ajuste a la cantidad de pasos por revolución y con esto aumentaba la precisión de la máquina. Se detallan las iteraciones efectuadas hasta conseguir un porcentaje de error por debajo de la unidad.

Cada medición hecha con el calibre se verificó tres veces y con calculadora en mano se obtuvo un promedio.



**Figura 3.34:** Cortes para la calibración de los ejes X Y. Fuente: elaboración propia.

Iteración	Dist por recorrer <i>mm</i>	Dist recorrida ( $\pm 0.05$ )mm	%e	Pasos por revolución
1	50	48.65	2.77	472.81
2	50	48.92	2.21	450.107
3	50	49.77	0.46	448.037
4	50	49.98	0.04	447.857

**Tabla 3.14:** Tabla iteraciones para ajustar los ejes X Y. Fuente: elaboración propia

$$\% = \frac{|(Practico - Teorico) * 100|}{Practico} \quad (3.2)$$

Al igual que el eje Z se le ordenó a la máquina moverse ciertas distancia de forma simultánea en X y Y. Para esta prueba se hizo con 100mm y arrojó el siguiente dato que se muestra en la figura 3.35. Esto se tradujo en que el eje X poseía una precisión de 0.0009 mm $\pm$ 0.04%. Mientras que el eje Y poseía una precisión de 0.0006 mm $\pm$ 0.04%.

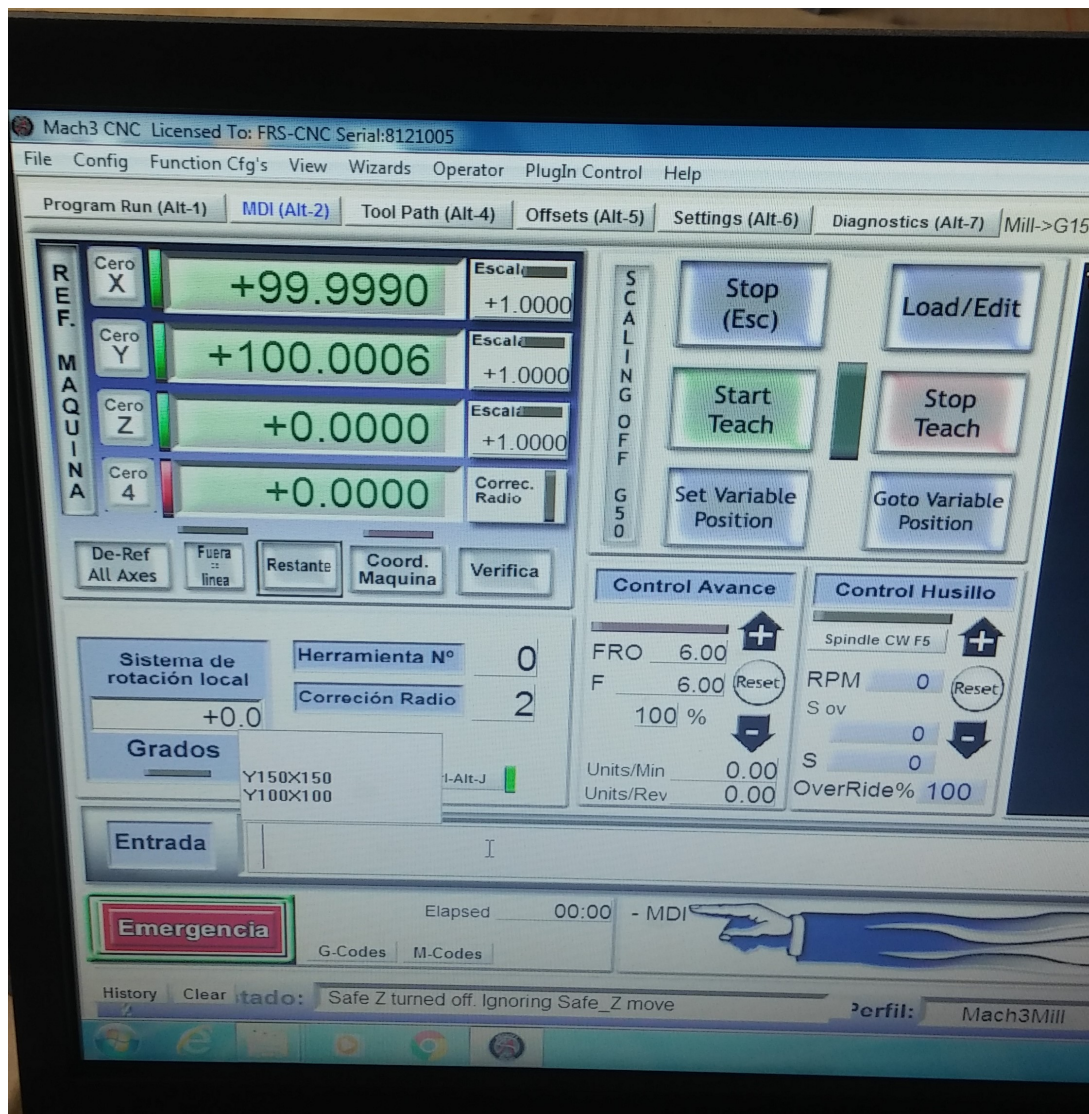


Figura 3.35: Prueba de calibración ejes X Y. Fuente: Mach3

### 3.6 Verificación de tornillo del Eje Z autoasegurante

Se corroboró este hecho usando las ecuaciones 3.3 y 3.4 del Mott [32]. Con  $T_u$  = par torsional para mover la rosca hacia arriba medido en  $N.m$ ,  $T_b$  = par torsional para mover la rosca hacia abajo medido en  $N.m$ ,  $L$ =paso efectivo del tornillo medido en  $mm$ ,  $F$ =carga que soporta el tornillo medida en  $N$

$$\begin{aligned} T_u &= 0.1777FL \\ &= 0.177 * 157.094 * 3.63 * 10^{-3} \\ &= 0.107N.m \end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned} T_b &= 0.143FL \\ &= 0.143 * 157.094 * 3.63 * 10^{-3} \\ &= 0.086N.m \end{aligned} \tag{3.4}$$

### 3.7 Validación del armazón

Se hizo un análisis visual y manual ambos superficiales, para conocer posibles inconvenientes, por ejemplo: fijación de componentes, vibraciones del carro ante estímulos manuales dependiendo de la posición del motor tipo espiga, colocación de los acoples entre ejes y motores, altura y nivelación de la mesa. Luego se utilizó software CAD para modelar en 3D la máquina. Se efectuaron análisis a mano guardando una memoria de cálculos para conocer el comportamiento de los diferentes elementos del armazón ante varios esfuerzos como: la oposición del material al avance de la fresa, pandeo de la fresa, torque de los motores a pasos y suposición del comportamiento del carro al ser soportado sobre un riel y no dos, esto para poder describir el posible escenario al que estarán sometidos los tres ejes.

#### 3.7.1 Inspección visual

Al efectuar varias pruebas de movimiento de los ejes y fresado coordinado se pudo observar que el carro soporta los esfuerzos(flexión en los ejes X y Y) ocasionados por la fresa. La bancada era un tabla de plywood de una pulgada de espesor. Se logró apreciar soldadura como método de unión entre elementos, no obstante varios de los cordones fueron esmerilados con propósitos estéticos. No se conoce la penetración del cordón, el tipo de electrodo, técnica y tipo de soldadura.

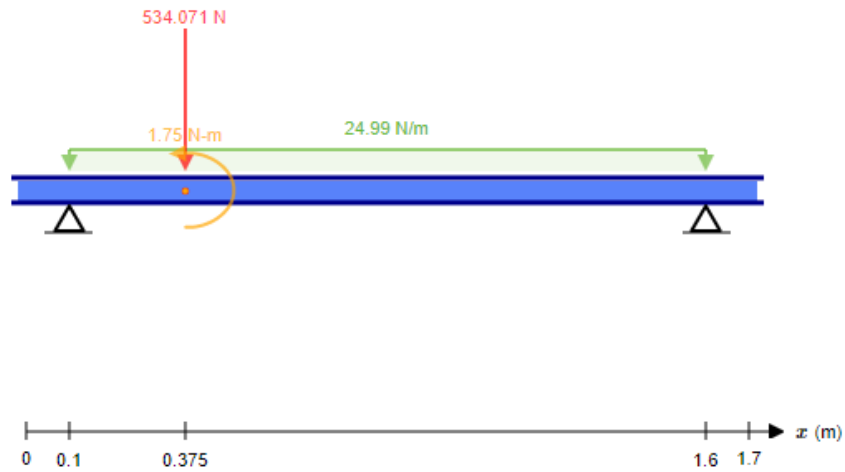
#### 3.7.2 Análisis estático debido a la flexión

Para los ejes X y Y se hizo un análisis por flexión en vigas. No obstante el eje X ocupó de un análisis por flexión pura, para descartar que el peso del eje Z provocara un par tan



grande que hiciera rotar al eje X. Al no conocer la procedencia del tubo de acero (estructura de la máquina) pero si su material "hierro negro" se usó una ficha técnica del proveedor SUMITEC [44] y se encontró el módulo de elasticidad  $E = 200 GPa$ , límite a la fluencia  $S_y = 250 MPa$ , luego se obtuvo el momento de inercia y área efectiva de otra ficha técnica del proveedor METALCO [26] porque contaba con las propiedades para un perfil similar al empleado, tubo cuadrado de 2 in (50.8 mm) con 1.8 mm de espesor.  $I_x = I_y = 1.26 * 10^{-7} m^4$  y  $A_e = 3.33 * 10^{-4} m^2$

Para el eje Y, la viga soportó un riel o patín que idealmente se comportó como una carga distribuida, una fuerza puntual (carga completa del eje Z) centrada o en una posición lejos del centro, un momento provocado por el avance de la fresa y dos reacciones debido a los apoyos, como se aprecia en el DCL de la figura 3.36.



**Figura 3.36:** Primer DCL para la viga que simula los ejes X y Y. Fuente: [42]

Se tomó como carga uniformemente distribuida al riel, porque es un elemento cuyo peso es aplicado según la ubicación del carro. Cabe aclarar que los cálculos se realizaron suponiendo que toda la carga estaría reposando en un riel, en lugar de dos. La solución de este problema, se dividió en dos partes, la primera fue calcular el momento y fuerzas debido al avance de la fresa y la segunda el cálculo por flexión en la viga, tomando en cuenta todas las cargas a las que estuviese sometida. Se acudió a Beam HPC, una aplicación para dispositivos con sistema operativo Android, *Beam HPC* que facilitó el procedimiento.

La fuerza y momento ejercidos por la fresa con las siguientes ecuaciones [16]:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3.5)$$

Con  $\omega$  la velocidad angular medida en radianes por segundo  $[rad/s]$ ,  $n$  revoluciones por minuto a las que gira la fresa  $[rpm]$

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (3.6)$$

Con  $M$  momento debido al avance de la herramienta medido en Newton metro  $[N.m]$ ,  $P$

potencia máxima del motor tipo espiga medida en Watts [W]

$$F = \frac{M}{r} \quad (3.7)$$

Con  $F$  fuerza debido al avance de la herramienta medida en Newton [N],  $r$  el radio de la fresa medido en metros [m] (parte que entra en contacto con el material).

Sea  $n = 12000$ ,  $P = 2.2kW$  para una fresa de corte tipo "V" de  $45^\circ$  y usando las ecuaciones 3.5, 3.6, 3.7 los resultados fueron (tabla 3.15):

Radio( $\pm 0.05$ )mm	Profundidad( $\pm 0.05$ )mm	Momento N.m	Fuerza N
4.75	5	1.75	368.57
3.25	3	1.75	538.68
2.25	2	1.75	778.09
1.75	1	1.75	1000.40

**Tabla 3.15:** Resumen de fuerza y momento ejercidos por la fresa. Fuente: Elaboración propia

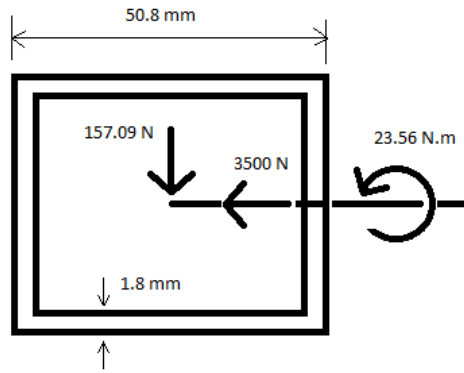
Empleando *Beam HPC* se obtuvo los valores y se plasmaron en la tabla 3.16,

Comportamiento eje Y			
Distancia m	Cortante N	Momento N.m	Desplazamiento mm
$x = L/4 = 0.425$	404	187	1.74
$x = L/2 = 0.85$	286	235	2.27
$x = 3L/4 = 1.275$	-418	178	1.62

**Tabla 3.16:** Resumen de resultados análisis por deflexión para eje Y. Fuente: Elaboración propia

El eje X se analizó tomando en cuenta la flexión con carga excéntrica en un plano de simetría, con un momento que generó la carga del eje Z, el peso del eje Z, una fuerza por el avance de la fresa, como se aprecia en el DCL de la figura 3.37. El radio de giro del eje Z respecto al X se midió desde el riel de soporte hasta la punta de la fresa y fue de  $150 \pm 0.05$  mm. La fuerza ejercida por la fresa se dimensionó para el peor de los casos donde la herramienta tuviese un diámetro de 1 mm usando la magnitud del momento de la tabla 3.15 y la ecuación 3.3. El criterio de elección de la fresa se debió a que para propósitos del producto no conviene emplear una herramienta de menor diámetro por facilidad para el proceso post fundición.

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{M}{r} = \frac{M}{d/2} \\
 &= \frac{1.75}{(1 * 10^{-3})/2} \\
 &= 3500N
 \end{aligned} \quad (3.8)$$



**Figura 3.37:** DCL de la flexión presente en el eje X. Fuente: elaboración propia

La ecuación 3.9 mostrada resolvió el esfuerzo al que estaba sometida la viga. No obstante la misma estaba sometida a esfuerzos en la dirección del eje Y 3.11 y otra en el eje Z 3.10 que tuvo diferentes comportamientos al variar el radio de palanca "c", esto organizó en la tabla 3.17

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{Mc}{I} \quad (3.9)$$

$$\sigma_z = \frac{-3500}{3.33 * 10^{-4}} + \frac{23.56 * c}{1.26 * 10^{-7}} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \frac{-157.09}{3.33 * 10^{-4}} \\ &= 0.47 MPa \end{aligned} \quad (3.11)$$

Comportamiento eje Z	
Radio mm	Esfuerzo MPa
$c = l/4 = 12.7$	-8.13
$c = l/2 = 25.4$	-5.76
$c = 3l/4 = 38.1$	-3.38

**Tabla 3.17:** Resumen de resultados análisis por flexión para eje X en el plano YZ. Fuente: elaboración propia

Por último para validar la estructura, se escogió momento de mayor magnitud de la tabla 3.16 y se obtuvo el esfuerzo debido a flexión que actuó en el eje Z:

$$\begin{aligned}
\sigma_z &= \frac{Mc}{I} \\
&= \frac{-286 * 25.4 * 10^{-3}}{1.26 * 10^{-7}} \\
&= -57.65 MPa
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Se tomó como esfuerzos principales  $\sigma_1 = 0.47 MPa$  (ecuación 3.11) y  $\sigma_2 = -57.65 MPa$  (ecuación 3.12) por ser los de menor y mayor magnitud (respectivamente), luego se acudió a la teoría de fallas para carga estática con el criterio de energía de distorsión o Von Misses obtenido con una calculadora para círculo de Mohr [3] con lo que se llegó a  $\sigma_{VM} = 57.89 MPa$ . Para dar con el factor de seguridad se usó la ecuación 5.19 del Shigley [7] con  $S_y = 250 MPa$ :

$$\begin{aligned}
FS &= \frac{S_y}{\sigma_{VM}} \\
&= \frac{250}{57.89} \\
&= 4.32
\end{aligned} \tag{3.13}$$

## 3.8 Interfaz de usuario

### 3.8.1 Mach3

Se empleó el software Mach3 este mostró siete ventanas de configuración y seguimiento de las operaciones, pero el usuario únicamente debe interactuar con dos de ellas como se muestra en las figuras 3.39 y 3.38. Al ser un software ya desarrollado, se recomienda al lector consultar el manual de usuario para mayores detalles [23]. La inducción al software para el futuro operador del equipo se hizo de manera presencial y esporádica, dividida en varias sesiones, por lo que no existe un debido registro del progreso en cuanto al entendimiento del programa. Se hizo una prueba cronometrada con una serie de tareas por hacer y los datos se presentan a continuación en la tabla

### 3.8.2 Paro de emergencia manual

Esta subsección se considera parte de este apartado puesto que es parte de la interacción que tendrá el operador con la máquina. Aunque la interfaz de usuario cuenta con un paro de emergencia se decidió incorporar un pulsador de seguridad (figura 3.40) para adicionar otra medida de prevención a la máquina en caso que el botón del software no funcione. Para la conexión se decidió conectar el segmento normalmente cerrado. Se resume la conexión entre el pulsador y la tarjeta controladora en de la siguiente manera: como primer paso se necesitó unir el PC5V con el GND que se encontraba al lado del P15.

Acción	Tiempo(minutos:segundos)
Encender la computadora	00:05
Activar la protección	00:15
Abrir Mach3	00:25
Verificar el cero máquina(Home)	00:35
Ir al cero pieza	00:45
Usar el sensor auto zeta	01:10
Cargar código G	00:35
Poner marcha	00:15
Regresar al cero máquina(Home)	00:25
Cerrar Mach3	00:05
Apagar la protección	00:15
Apagar computadora	00:08
Total	04:58

Tabla 3.18: Resultado de prueba de desempeño al operador

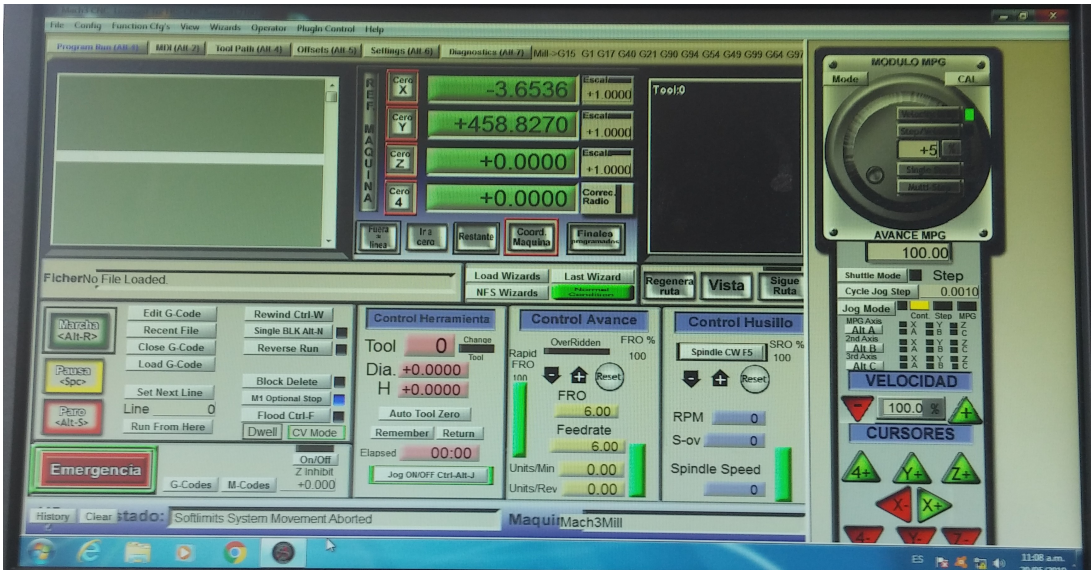
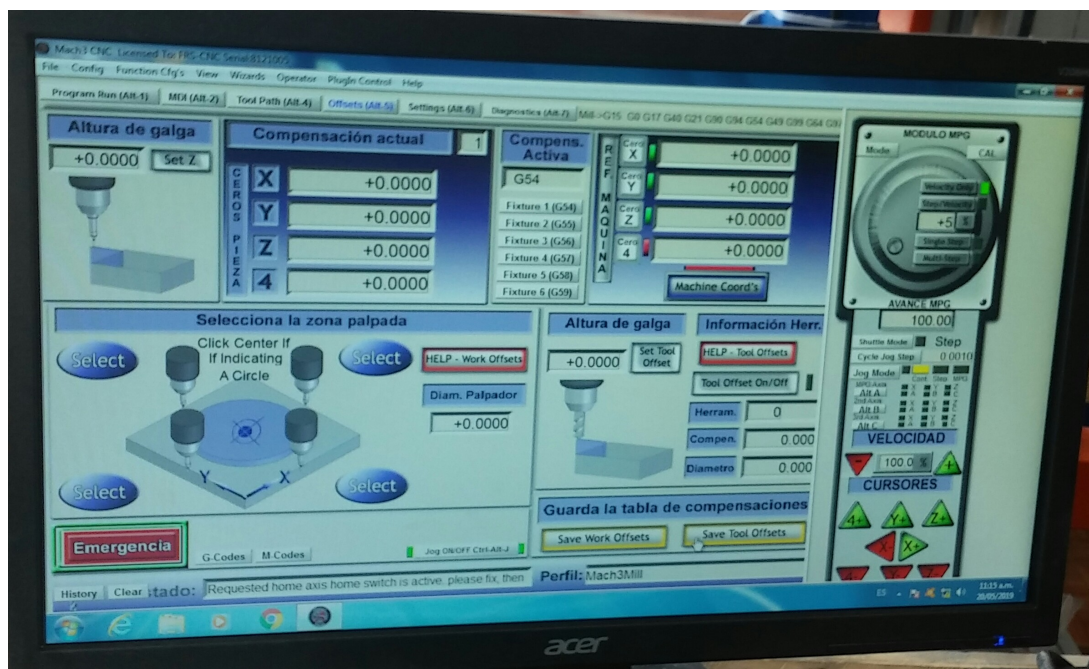


Figura 3.38: Ventana principal para el operador en Mach3. Fuente: elaboración propia

Luego se unió una de las patas(del interruptor NC) del pulsador con el P10 de la tarjeta y la otra pata al PC5V.



**Figura 3.39:** Ventana secundaria para el operador en Mach3. Fuente: elaboración propia



**Figura 3.40:** Pulsador de seguridad para paro de emergencia . Fuente: [28]



**Figura 3.41:** Gabinete de control. Fuente: elaboración propia



### 3.8.3 Sensor auto zeta.

Esta subsección se considera parte de este apartado puesto que es parte de la interacción que tendrá el operador con la máquina. Se resume la conexión entre el pulsador y la tarjeta controladora en de la siguiente manera: como primer paso se necesitó unir el PC5V con el GND que se encontraba al lado del P15. Luego se unió el cable que sale de la placa de contacto(figura 3.42) P11 de la tarjeta y el otro cable al PCGND de la tarjeta. El propósito de este sensor fue dar una altura correcta independientemente del espesor del material que será manufacturado, puesto que la máquina no tiene otro medio para conocer esta variable. Se adjuntan una serie de imágenes del proceso para conseguir la altura correcta. Se reitera que es importante leer el manual de operación de Mach3 [23]



Figura 3.42: Sensor auto zeta. Fuente: [1]

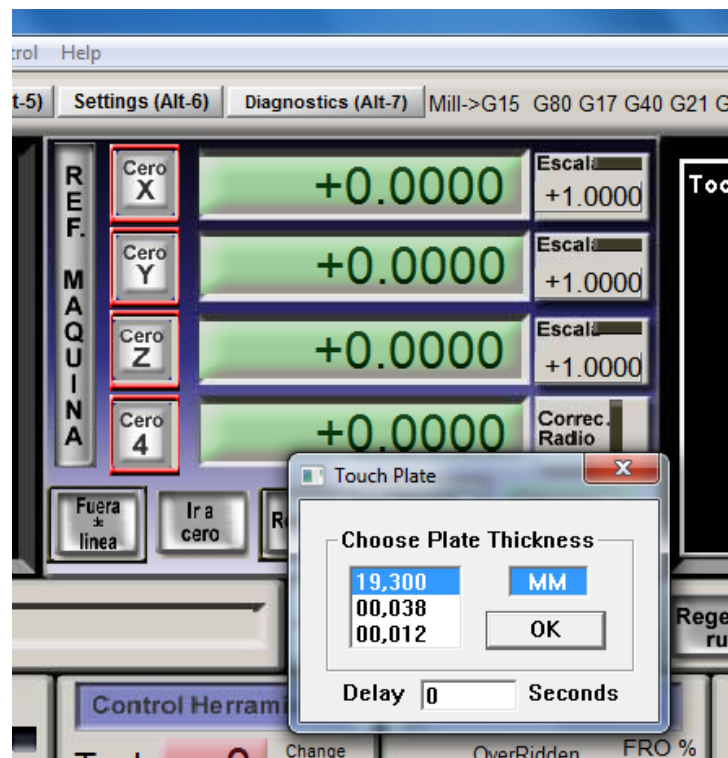
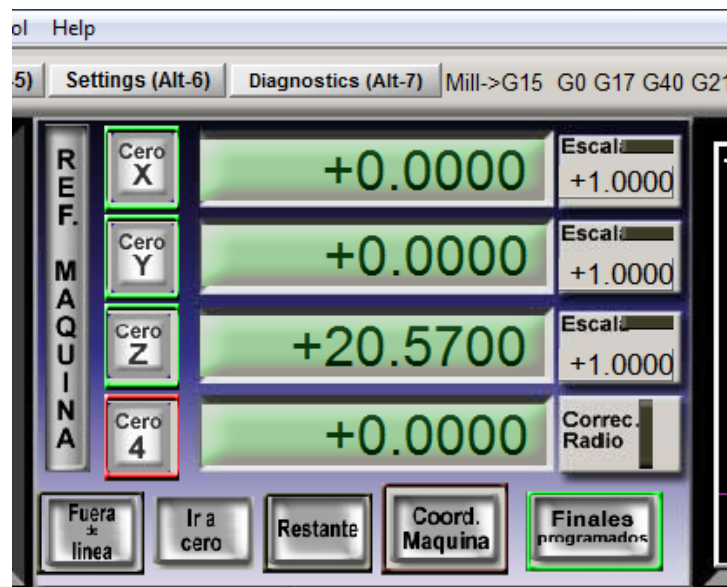


Figura 3.43: Primer cuadro de diálogo para la activación del sensor auto zeta. Fuente: Mach3



**Figura 3.44:** Fresa hace contacto con el sensor auto zeta. Fuente: elaboración propia



**Figura 3.45:** Cuadro de diálogo de finalización de sensado de altura. Fuente: Mach3

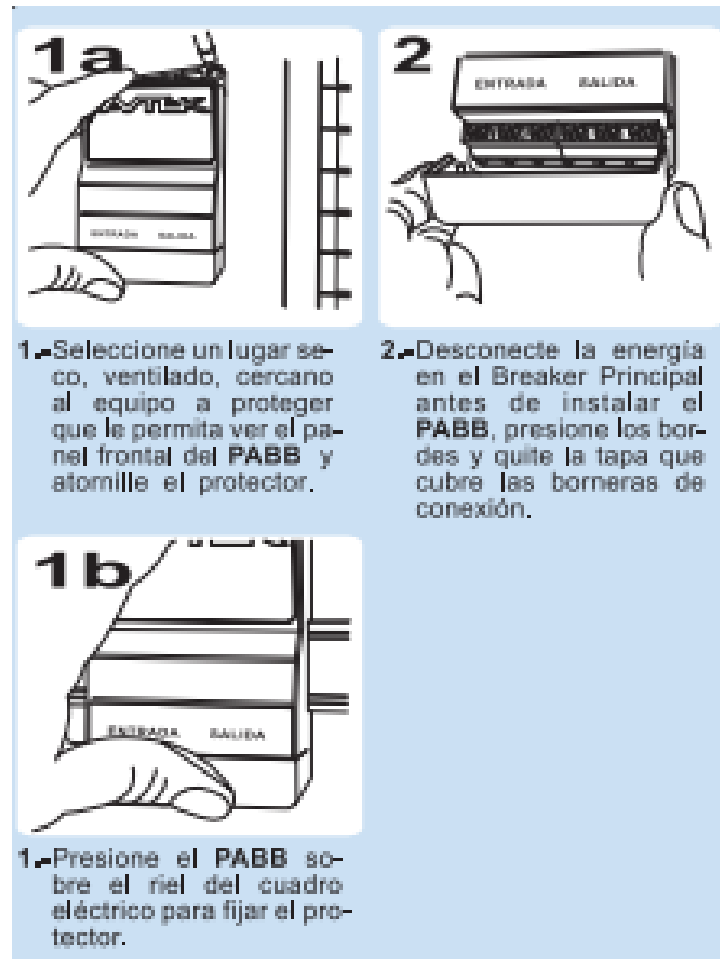


3.8.4 Protección de tensión

un sistema de protección para obligar al sistema a trabajar exclusivamente dentro de un rango de tensión y tener un tiempo de respuesta(a la reincorporación) en caso de detectarse una anomalía en el rango. El distribuidor SINGE cuenta con un dispositivo marca AVTEK modelo PABB-6622A que brinda protección ante fallas eléctricas como: sobretensión, bajatensión e interrupciones momentáneas [40]. Se muestran una serie de imágenes donde se explica la manera de conectar el circuito y en la figura B.1 del apéndice B se presenta su ubicación en la distribución eléctrica.

Especificaciones Técnicas:		
	PABB-3621A	PABB-6622A
VOLTAJE	120 VAC / 60 Hz	220 VAC / 60 Hz
CARGA MÁXIMA	12,000 BTU 3,600 VA - 30 AMP	48,000 BTU 6,600 VA - 30 AMP
AJUSTES DEL VOLTAJE BAJO	85 VAC - 120 VAC	165 VAC - 220 VAC
AJUSTES DEL VOLTAJE ALTO	120 VAC - 140 VAC	220 VAC - 265 VAC
AJUSTES DEL TIEMPO DE ESPERA	DESDE 5 Seg. HASTA 300 Seg.	
SUPRESOR DE SOBREVOLTAJES	1080 JOULES	
INHIBICIÓN ANTE FALSAS CAIDAS DE VOLTAJE	Desconexión Inteligente de 0 a 3 segundos	
TIPO DE CONEXIÓN BORNERAS	ENTRADA: (N - F - T) SALIDA: (T - N - F)	ENTRADA: (F2 - F1 - T) SALIDA: (T - F2 - F1)
DIMENSIONES (MM.)	35 x 86 x 127	
PESO (KGRS/LBS)	0,150 / 0,330	

Figura 3.46: Especificación técnica para PABB-6622A. [40]



**Figura 3.47:** Instalación pasos 1 y 2. Fuente: [40]

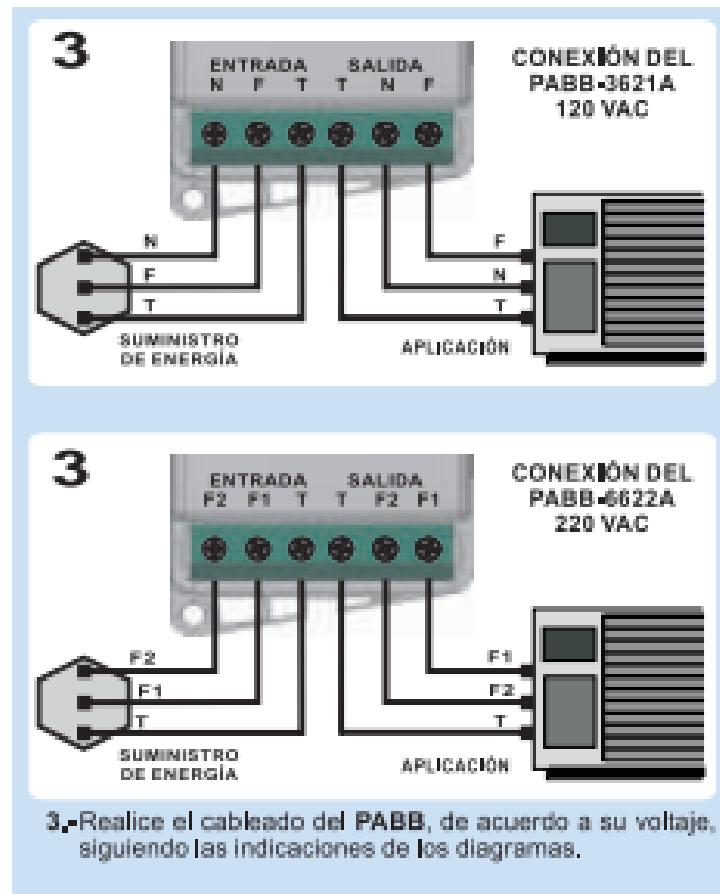


Figura 3.48: Instalación paso 3. Fuente: [40]

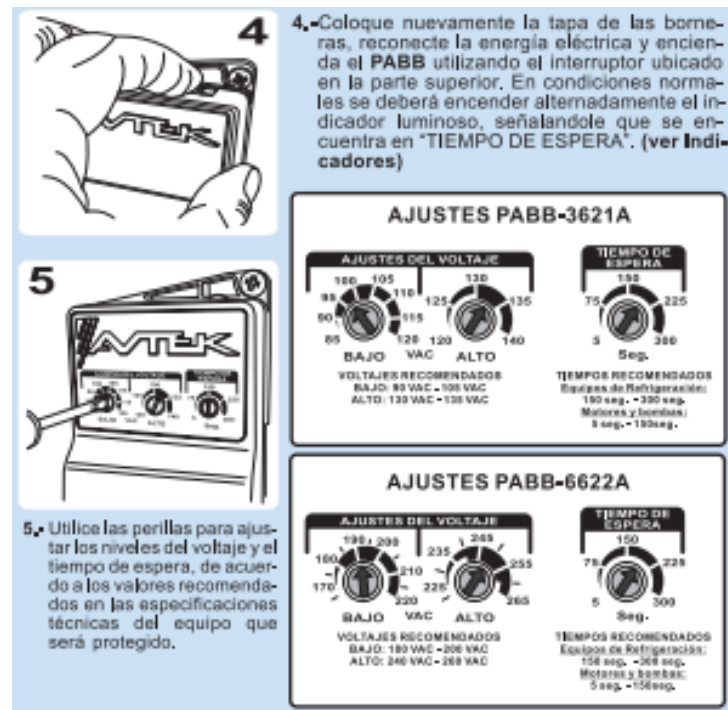
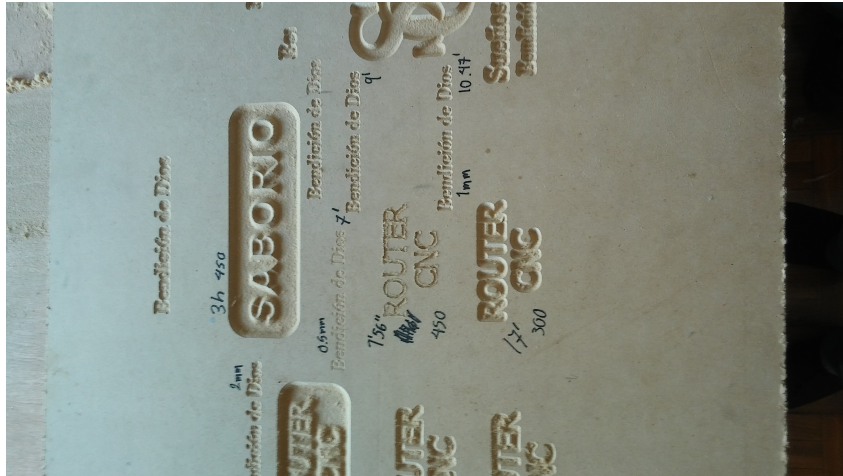


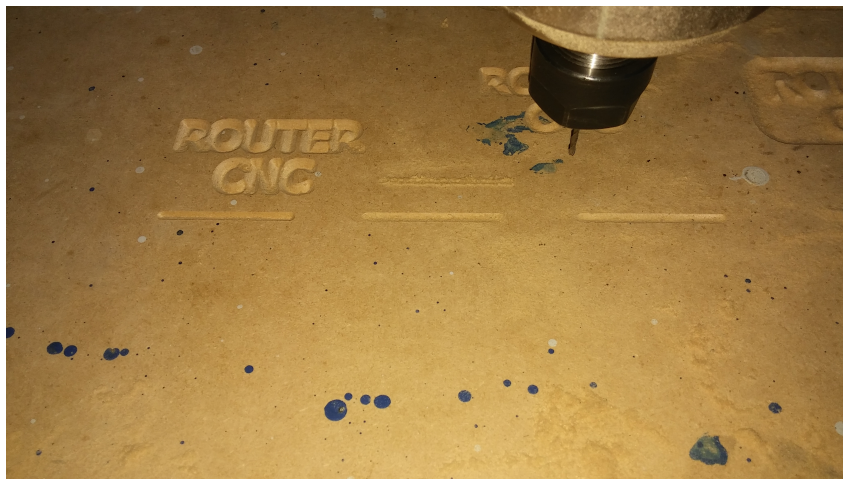
Figura 3.49: Instalación pasos 4 y 5. Fuente: [40]

### 3.8.5 Pruebas de concepto de todo el sistema de control

Aunque se hizo varias pruebas grabando algunas cosas a baja escala (figuras 3.50 3.51 3.52) destaca el escudo de la compañía que inicialmente se elaboró con menores dimensiones 3.53 y finalmente se fabricó en la dimensiones nominales para ser colgado a la fachada de la empresa 3.57. Se siguió el diagrama del CNC, iniciando por el CAD, luego el CAM y por último la manufactura automática.



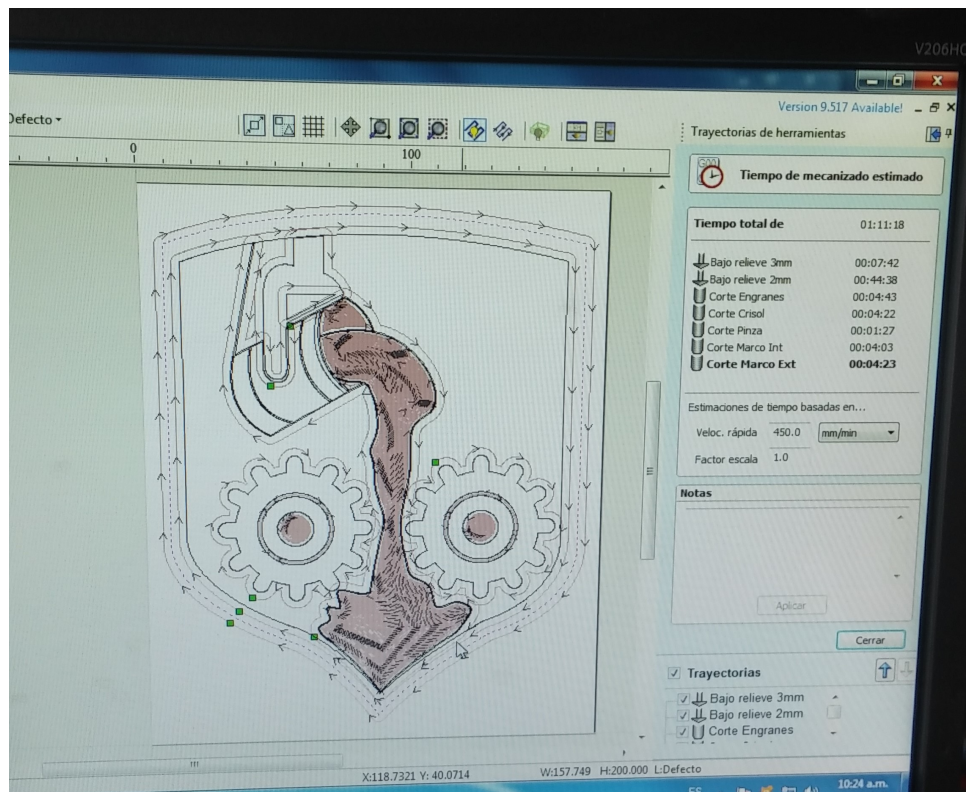
**Figura 3.50:** Pruebas Generales. Fuente: elaboración propia



**Figura 3.51:** Pruebas Generales. Fuente: elaboración propia.



**Figura 3.52:** Pruebas Generales. Fuente: elaboración propia.



**Figura 3.53:** CAD de prototipo de escudo. Fuente: elaboración propia





**Figura 3.54:** CAM de prototipo de escudo. Fuente: elaboración propia



**Figura 3.55:** Prototipo finalizado.



**Figura 3.56:** Modelo fabricado. Fuente: elaboración propia.





**Figura 3.57:** Modelo terminado. Fuente: elaboración propia.



## 3.9 Plan de mantenimiento

Las variables no automatizadas requirieron de calibración, y esto se logró con la elaboración de un plan de mantenimiento preventivo. Por ejemplo: la lubricación de los rodamientos, el filo de la fresa y limpieza de los ejes. Además, se establecieron los procedimientos de limpieza y calibración de los diferentes componentes mecánicos, así mismo escogencia de las herramientas idóneas para llevar a cabo estas labores. Los procedimientos se plasmaron en un documento gráfico que mostró el uso de las herramientas que así lo requerían. Se debe consultar la sección 2.6 para comprender las rutas que se encuentran en el apéndice C.

Para este programa se valoraron aspectos como el corte en las operaciones de manufactura, el aspirado de las partículas finas, el bombeo de agua a motor espiga y la transmisión de potencia que genera el movimiento lineal. Posteriormente se elaboró una tabla con los costos para estimar la inversión requerida con el propósito de alargar la vida útil del equipo.

## 3.10 Inversión económica

Regresando a la sección 2.4, se puede apreciar en las tablas 2.1 2.2 que existieron dos aspectos fundamentales por los cuales las otras opciones se descartaron. La primera es el precio tan elevado de la máquina MULTICAM que aunque es bastante atractiva por sus rutinas automáticas de mantenimiento, sistema automático de cambio de herramientas y garantía, excede (en palabras del asesor de la empresa) la capacidad de inversión en cuanto a capital de la compañía. La segunda fue la inseguridad de importar una máquina de la cual no se tiene garantía en el ámbito local (Blue Elephant) y tampoco se conocía la existencia de personal calificado para el mantenimiento del equipo.

Tras finalizada la máquina se mostró el detalle de lo invertido contra lo presupuestado.

Para mayor evidencia del progreso de la máquina acudir al apéndice F.

Presupuesto		
Cantidad	Nombre	Costo
1	Kit de motores a pasos NEMA 23, controladores, fuente de poder 36 Volts y Interfaz CNC 5 Ejes configurable	\$454
3	Kit barras estabilizadoras, tornillos de bolas y collarines	\$1500
3	Acoples	\$35
3	Chumaceras	\$100
3	Barras perfil cuadrado de acero estructural	\$25
2	Lámina platinas de acero	\$50
2	Lámina de aluminio	\$50
1	Kit Spindle 220V 24000RPM con variador 220V 2.2kW y bomba de agua para enfriar motor	\$543
1	Solidworks Premium Package 2018	*
1	Licencia Mach3 alquiler de 3 meses	\$175
1	Módulo ESP8622	\$25
1	Computador para Mach3	\$115
2	Tableros de control	\$50
Varios	Tornillos	\$120
Varios	Cables eléctricos	100
1	Fajas plásticas para acarrear cables	\$120
1	Mecanizado de piezas (Mecánico de precisión)	\$500
1	Remuneración (Servicios profesionales)	\$960
2	Servicios (agua, electricidad, internet)	++
	<b>Total</b>	<b>\$4922</b>

**Figura 3.58:** Inversión real por el centro de mecanizado. Fuente: elaboración propia

# Capítulo 4

## Análisis de resultados

### 4.1 Validación de la armadura

Para la validación de la armadura, varios aspectos del diseño mecánico no fueron tomados en cuenta al para el análisis, por ejemplo la evaluación de la resistencia al cortante en las soldaduras, los concentradores de esfuerzo, pandeo en las patas de la mesa y el comportamiento dinámico de la máquina.

En documentos o *papers*([4]) no se tomó en cuenta porque se verificó su capacidad de forma experimental o bien simulada [16] pero sin entrar en análisis dinámicos puesto que aumentaba la complejidad del diseño y según Beer en su libro de Estática [14] una estructura funciona de manera óptima con su diseño estático en tanto no se involucren movimientos repentinos o esfuerzos de gran magnitud que sometan a los elementos a compresión y tensión constantemente.

#### 4.1.1 Inspección visual

Se logró apreciar soldadura como método de unión entre elementos, no obstante varios de los cordones fueron esmerilados con propósitos estéticos. No se conoce la penetración del cordón, el tipo de electrodo, técnica y tipo de soldadura. Al no existir toda esta evidencia ni pericia en el ámbito, el análisis de los cordones debido al cortante se descartó. Las vibraciones del carro se resolvieron al calibrar los ejes puesto que con eso se redujo la cantidad de pasos por revolución en los motores.

#### 4.1.2 Análisis estático debido a la flexión

Ciertos proveedores de material brindan datos esenciales de los productos que venden, en sus fichas técnicas como momento de inercia por ejes, módulo de sección y radio de giro. Además de las propiedades inherentes como esfuerzo a la fluencia, esfuerzo a la tensión,

módulo de elasticidad, entre otros. Para este caso, esos datos no se encontraron, por tanto se decidió acudir a fichas técnicas de proveedores reconocidos, aunque al no tener herramientas suficientes fue imposible asegurar las propiedades de los perfiles usados.

Aprovechando que esto es un tema bastante estudiado, se calcularon los datos concernientes al diagrama de momento flector y círculo de Mohr con herramientas en línea o aplicaciones para dispositivos móviles. Luego se empleó la teoría de energía de distorsión para materiales dúctiles. Usando el máximo esfuerzo a la fluencia y el esfuerzo de Von Mises se consiguió un factor de seguridad mayor a la unidad, para ser específico superior a cinco, por lo que se decide que el análisis prueba que la estructura soporta la carga estática.

### 4.1.3 Verificación de tornillo del Eje Z autoasegurante

Se probó que al tratarse de tornillo de bolas, no se tuvo la propiedad de autobloquearse dada su baja fricción entre tuerca y tornillo. Sin embargo, al apoyar la carga sobre la tuerca del tornillo, se presenta la impulsión negativa [32] por tanto la carga no intentará bajar.

## 4.2 Validación de los motores a pasos

Al no encontrarse fichas técnicas específicas, se usaron fichas de productos similares. Que para propósitos del proyecto funcionaron porque facilitaron la comprensión de comportamientos semejantes y escenarios donde se ocupó trabajar en el peor de los casos.

### 4.2.1 Determinación del torque

Aprovechando que las mesas router han sido bastante estudiadas, se investigó en sitios web de aficionados y documentos especializados en el tema [4], donde han decidido compartir su conocimiento y se encontró criterios de elección y un cuadro de excell [25] que aproxima el valor necesario para el torque que ocuparía un motor a pasos para trasladar una carga. Acá se encontró que este cálculo fue más complejo que simplemente usar la fórmula de  $M = Fd$  (Momento es igual a fuerza por distancia) porque se tomaron en cuenta propiedades del tornillo de transmisión y del motor a pasos. Para el caso del eje Y se obtuvo que el torque mínimo estaba por debajo de los 3 N.m, aunque los datos en la ficha técnica usada correspondían a un motor con 2.8 N.m, esto se consideró como un valor aceptable. Por tener un error bajo y que la carga se sobredimensionó suponiendo el peor escenario.

El eje X debía trasladar una carga menor a la del eje Y, y igual manera el motor a pasos cumplió porque poseía un par nominal de 3 N.m. Para el eje Z se requería de un motor

con un par de de 1.5 N.m.

Por tanto los tres motores quedaron validados para su aplicación.

## 4.3 Sistema de Control automático

Se aprovechó que cada subsistema de control (Variador y Controladora) contaba con su propio regulador o compensador y se redujo el diseño de modelos empíricos y analíticos.

### 4.3.1 Tarjeta Controladora

Los manuales de usuario encontrados en línea no contaban con toda la información de la tarjeta por tanto, las pruebas de concepto y los datos de sitios web aficionados, jugaron un papel importante para dar con la solución. La falta de instrumentación retrasó el avance de las pruebas puesto que solo se podía medir con un multímetro de puntas los valores a las salidas

### 4.3.2 Variador de frecuencia

Este dispositivo funcionó de manera óptima y no presentó inconvenientes puesto que contaba con un manual de usuario enviado por el fabricante.

### 4.3.3 Circuito de adaptación entre sensores y tarjeta controladora

A modo de suposición esta adaptación *pull-down* funcionó como un divisor de tensión, aunque solo se involucrara una resistencia por cada interruptor. Se consultó a dos ingenieros electrónicos sobre el tema y las posibles respuestas a esto fueron:

1. Resistencia pull-up en las entradas de la tarjeta controladora, que al no tener información (ficha técnica) y equipo suficiente, no fue posible estimar su valor.
2. Resistencia pull-up en la salida de los interruptores inductivos, que al no tener información (ficha técnica) y equipo suficiente, no fue posible estimar su valor.
3. Las dos opciones anteriores.

#### 4.3.4 Controladores de micro pasos

Aunque existe teoría que establece que aumentar más de ocho veces la cantidad de micro pasos del motor no causará mayor diferencia en la precisión [29], se decidió experimentar y diez fue el número óptimo donde se conservaba precisión y suficiente velocidad para los desplazamientos. La falta de instrumentación retrasó el avance de las pruebas puesto que solo se podía medir con un multímetro de puntas los valores a las salidas

#### 4.3.5 Pruebas de concepto de todo el sistema de control

Una vez probados todos los componentes de forma aislada se unieron todos los subsistemas y al poner en marcha la máquina, se iniciaron las calibraciones y ajustes. Casi todos los inconvenientes presentados radicaron en mal ajuste de los ejes, una vez resuelto esto, la máquina comenzó a trabajar de forma óptima.

En la teoría la protección cumplió con lo esperado al resguardar el equipo ante un fallo en el tendido público.

### 4.4 Inversión económica

Al comparar los valores de las figuras 2.2 y 3.58 se puede notar que se ahorra cerca del 30% de lo presupuestado al inicio y tras mostrar el cuadro comparativo se afirmó la viabilidad de fabricar la máquina nueva.

# Capítulo 5

## Conclusiones

- El diseño de la máquina fue posible gracias a que se consultaron documentos donde se exponían equipos similares como la mesa router CNC de bajo costo.
- Debido a que el router presentaba un número considerable de piezas no estándar fue propicio levantar los planos del conjunto mecánico, para facilitar la comprensión de la naturaleza de la máquina y replicar las piezas de manera confiable.
- Empleando un cuadro comparativo formado por tres propuestas para la incorporación de una mesa router CNC, se probó que la opción de desarrollar este equipo, con elementos robustos pero no onerosos, cumplió con los requerimientos y especificaciones planteadas.
- Los diagramas de conexión de los elementos eléctricos y electrónicos fueron elaborados con éxito en la calidad de planos de distribución.
- Utilizando el software Mach3 se consiguió incorporar de con éxito una interfaz de usuario para la operación presencial de la mesa router CNC mediante una tarjeta controladora de cinco ejes.
- Tomando en cuenta las variables no automatizables de la máquina se formuló un plan de mantenimiento preventivo cuyo fin fue llevar control del desgaste de componentes vitales para el su óptimo desempeño.
- Basado en las características del equipo anterior, su rediseño permitió la incorporación armoniosa de los diferentes actuadores y sus respectivos controladores.
- Dado que un gran número de componentes del equipo no tenían vasta documentación fue posible conseguir comportamientos esperados al basarse en propiedades de otros componentes similares más no iguales.

# Capítulo 6

## Recomendaciones

- En caso de no contar con los criterios técnicos suficientes, es menester para un proceso de diseño de máquinas y mecanismos, respetar los criterios del desarrollador. Con el propósito de evitar contratiempos y malas prácticas.
- Se debe tener herramientas e instrumentos fiables para conseguir mediciones y pruebas precisas y exactas.
- Se debe valorar delimitar el plan de acción de un proyecto para cumplir a cabalidad todo lo propuesto.



# Bibliografía

- [1] Amazon.com. Cnc auto z zero touch plate z axis setter measurement with alligator clip - find z height fast and accurate [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL [https://www.amazon.com/s?k=mach3+cnc+z&\\_\\_mk\\_es\\_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&ref=nb\\_sb\\_noss\\_2](https://www.amazon.com/s?k=mach3+cnc+z&__mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&ref=nb_sb_noss_2).
- [2] L. X. Arana. Variadores de frecuencia para el control de velocidad de motores asincrónicos jaula de ardilla [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/12956/1/T-UCE-0010-002-2017.pdf>.
- [3] bendingmomentdiagram.com. Calculadora de círculo de mohr [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://bendingmomentdiagram.com/es/free-calculator/mohrs-circle-calculator/>.
- [4] P. A. Khan R. A. Reddy B. Jayachandraiah, O. V. Krishna. Fabrication of low cost 3-axis cnc router [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL [http://www.ijesi.org/papers/Vol\(3\)6/Version-1/A036101010.pdf](http://www.ijesi.org/papers/Vol(3)6/Version-1/A036101010.pdf).
- [5] PIAL'S BLOG. My attempt to make a desktop cnc machine [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <http://www.pial.net/my-attempt-to-make-a-desktop-cnc-machine/>.
- [6] M. Brown. *Practical Switching Power Supply Design*. Motorola, 2012.
- [7] Nisbett J. Keith Budynas, Richard G. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mc Graw Hill, 2012.
- [8] Piedra C. *Plan de mantenimiento basado en el RCM*. Apuntes de clase para MT9002, Área académica de ingeniería mecatrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2017.
- [9] RATTM Motor Company. Breakout board v5 user manual [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://forum.strojirenstvi.cz/download/file.php?id=42118>.
- [10] demaquinasyherramientas.com. Introducción a la tecnología cnc [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/introduccion-a-la-tecnologia-cnc>.

- [11] Ebay.com. Geekcreit 5 axis cnc breakout interface board for stepper driver mach3 with usb [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://www.ebay.co.uk/itm/Geekcreit-5-Axis-CNC-Breakout-Interface-Board-For-Stepper-Driver-Mach3-With-USB-173626239610>.
- [12] Yueqing Hengwei Electronics. Cylinder inductive proximity switch series [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://opencircuit.nl/ProductInfo/1000064/LJ12A3.pdf>.
- [13] encoder.com. ¿qué es un encoder? [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <http://encoder.com/blog/encoder-basics/que-es-un-encoder/>.
- [14] D. Mazurek E. R. Eisenberg F. P. Beer, E. R. Johnston. *Mecánica vectorial para ingenieros. Estática*. Mc Graw Hill, 2009.
- [15] Huanyang. Huanyang inverter [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://www.cnc4you.co.uk/resources/VFD%20CNC4YOU.pdf>.
- [16] C. Hurtado. Diseño y construcción de un prototipo de fresadora-cnc [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27540/PFC\\_Cesar\\_Hurtado\\_Juarez.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27540/PFC_Cesar_Hurtado_Juarez.pdf).
- [17] LoveJoy Inc. Jaw2010catalog [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://www.lovejoy-inc.com/wp-content/uploads/2017/11/Jaw2010catalog.pdf>.
- [18] National Instruments. Stepper motors and encoders [online, visitado el 2014-12-17]. URL [www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-311](http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-311).
- [19] interempresas.net. Fresar aluminio parece fácil, pero sólo si se realiza inteligentemente [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/183659-Fresar-aluminio-parece-facil-pero-solo-si-se-realiza-inteligentemente.html>.
- [20] Ogata K. *Sistemas de control moderno*. Prentice Hall, 2003.
- [21] New Fangled Solutions LLC. Mach3 [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://www.machsupport.com/shop/mach3/>.
- [22] CNC4YOU Ltd. Cw5045 [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://cnc4you.co.uk/resources/CW5045.pdf>.
- [23] ArtSoft Mach3. Manual de operación mach3 [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL [http://www.xmmatic.es/Img\\_Files/Manuales/Manual%20Mach3%20-%20Espanyol.pdf](http://www.xmmatic.es/Img_Files/Manuales/Manual%20Mach3%20-%20Espanyol.pdf).
- [24] maquineros.com. Diseño y creación de equipos cnc [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://maquineros.com/>.

- [25] Foro MetalAficion. Cálculo y selección de motores paso a paso [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://foro.metalaficion.com/index.php?action=dlattach;topic=12532.0;attach=5083>.
- [26] METALCO. Especificaciones para tubería estructural cuadrada en hierro negro y galvanizado [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://www.metalco.net/productos/tuberia-estructural/>.
- [27] micarpinteria.wordpress.com. El router [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://micarpinteria.wordpress.com/2011/03/08/el-router/>.
- [28] MicroJPM. Lay37(pcb) 660v @ 10a red emergency stop mushroom push button [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://www.microjpm.com/products/ad34366/>.
- [29] microPaP.com. Motores paso a paso aproximación teórica [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL [www.micropap.com/manuales/historicos/TeorPaP.pdf](http://www.micropap.com/manuales/historicos/TeorPaP.pdf).
- [30] micropap.com. Motores paso a paso vs servos [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <http://www.micropap.com/index.php/blog/motores/item/19-motores-paso-a-paso-vs-servos>.
- [31] RATTM MOTOR. 4 pcs nema23 23hs2430b 425oz-in dual shaft 2.8n.m 112mm length stepper motor stepping motor/3a for cnc router milling machine [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://www.aliexpress.com/item/4-pcs-NEMA23-425-0z-in-CNC-Dual-shaft-stepper-motor-stepping-motor-3-0A/32598309016.html>.
- [32] R. L. Mott. *Diseño de elementos de máquinas*. Pearson Educación, 2006.
- [33] polaridad.es. ¿qué es g-code? [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://polaridad.es/que-es-g-code/>.
- [34] Dorf R. *Sistemas de control moderno*. Prentice Hall, 2005.
- [35] Node MCU readthedocs. Nodemcu documentation [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://nodemcu.readthedocs.io/en/dev/>.
- [36] S.Aulia R.Ginting, S. Hadiyoso. Implementation 3-axis cnc router for small scale industry [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL [https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n17\\_34.pdf](https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n17_34.pdf).
- [37] Tecno Sagot. Acoples elastoméricos lovejoy [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://tecnosagot.com/elastomericos/>.
- [38] Brenner Industrial Sales and Supply. Energy chain system installation guide [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL [http://brennersales.com/Downloads/Igus\\_ECS\\_Installation.pdf](http://brennersales.com/Downloads/Igus_ECS_Installation.pdf).

- [39] Vishay Semiconductors. Tcrt5000, tcrt5000l [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://www.vishay.com/docs/83760/tcrt5000.pdf>.
- [40] Grupo Diez SINGE CR. Pabb-3621a / pabb-6622a [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <http://www.singecr.com/producto/pabb-3621a-pabb-6622a/>.
- [41] Grupo Diez SINGE CR. Protección y monitoreo de voltaje [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <http://www.singecr.com/categoria/proteccion-de-voltaje/>.
- [42] SkyCiv. Free beam calculator [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://skyciv.com/es/free-beam-calculator/>.
- [43] StepperOnline. 400w power supply s-400-36 [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://www.omc-stepperonline.com/download/S-400-36.pdf>.
- [44] SUMITEC. Acero estructural acero astm a36 [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <http://www.sumiteccr.com/acero/estructural/AE01.pdf>.
- [45] SureStep. Sistema de motores paso a paso [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://cdn.automationdirect.com/static/manuals/surestepmanualsp/surestepmanualsp.pdf>.
- [46] Wildi T. *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*. Prentice Hall, 2007.
- [47] tn tools. Fresa acero hssco8 2 corte recubrimiento tialn [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://www.tn-tools.com/fresas-acero-z2-2-cortes/fresa-acero-hssco8-2-corte-recubrimiento-tialn.html>.
- [48] www.sunpower uk.com. What is switch mode power supply? [online, visitado el 1 de agosto de 2019]. URL <https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-switch-mode-power-supply/>.

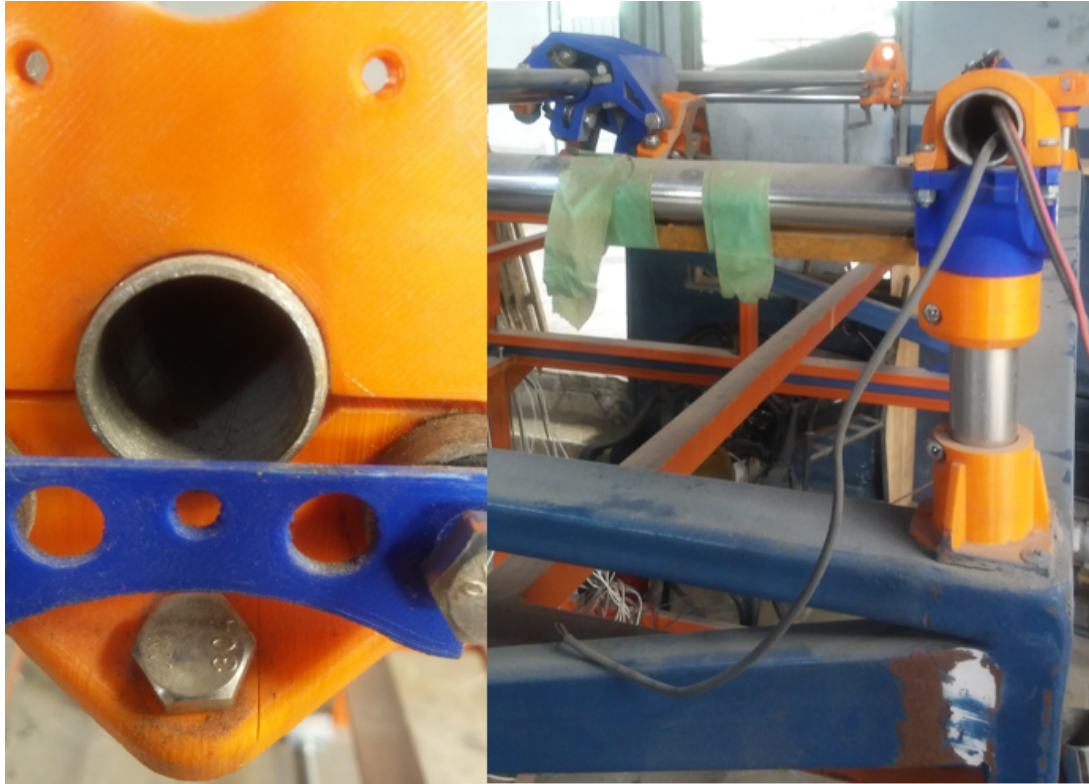
## Apéndice A

### Imágenes de la máquina anterior

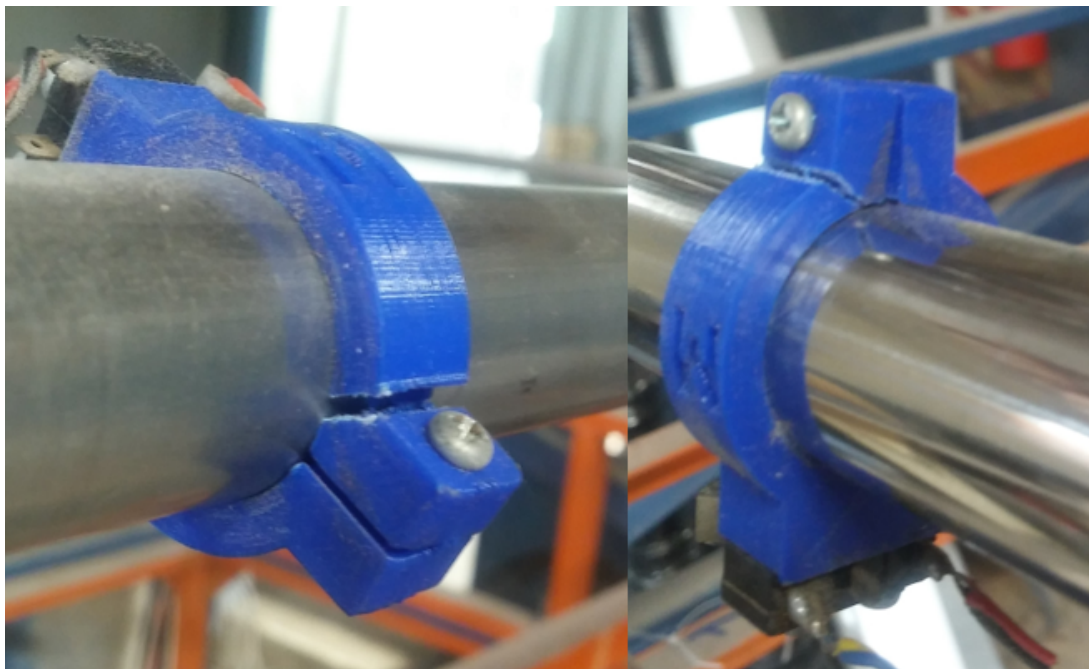


**Figura A.1:** Imagen del estado de la máquina anterior. Fuente: elaboración propia





**Figura A.2:** Imagen del estado de la máquina anterior. Fuente: elaboración propia



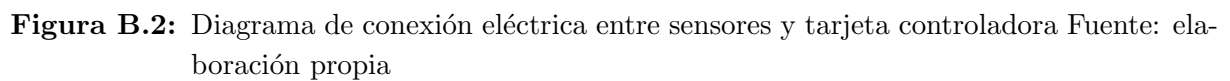
**Figura A.3:** Imagen del estado de la máquina anterior. Fuente: elaboración propia



**Figura A.4:** Imagen del estado de la máquina anterior. Fuente: elaboración propia








# Apéndice C

## Programa de mantenimiento preventivo

Para consultar todo el plan o programa de mantenimiento preventivo, dirigirse al siguiente enlace:

<https://drive.google.com/file/d/12HqDXKYlRknFBjQIDBVOzoivjZf8n0E3/view?usp=sharing>

		<b>Programa Mantenimiento Preventivo</b>			Página 1 de 2
<b>SISTEMA</b> Router CNC MDFUSA		<b>Realizado por:</b> Sebastian Obando Castro			
<b>Subsistema</b>		<b>Fecha:</b> 28/6/2019			<b>Versión 1.1</b>
FUNCION	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTOS	CONSECUENCIAS	
1 Cortar MDF a 12 000 (200Hz) rpm de forma fluida con velocidad de avance de 650 mm/min	1 No hay corte	1 Motor espiga apagado o sin comunicación con el variador	Variador no da respuesta, lanza error de operación	Protección del variador se puede dañar y debe ser reemplazado. Daño permanente a los motores a pasos puesto que trabajan fuera del rango de operación	
		2 Herramienta de corte inapropiada	Sin avance, sobrecalentamiento de los motores a pasos		
		3 Material no es MDF y no tiene propiedades similares	Sin avance, sobrecalentamiento de los motores a pasos		
	2 Corte no fluido	1 Tensión eléctrica insuficiente para el variador (220 Volts AC)	Variador dispara protección, lanza error de alimentación	Daños en el producto final, pérdida de precisión en los cortes. Protección del variador se puede dañar y debe ser reemplazado. Daño permanente a los motores a pasos puesto que trabajan fuera del rango de operación	
		2 Herramienta de corte desafilada	Avance forzado, sobrecalentamiento de los motores a pasos		
		3 Material no es MDF pero tiene propiedades similares	Avance forzado, sobrecalentamiento de los motores a pasos		


**Figura C.1:** Primera Sección RCM. Función uno Fuente: elaboración propia

1	Cortar Aluminio a 15000 rpm (250Hz) de forma fluida con velocidad de avance de 650 mm/min	1	No hay corte	1	Motor espiga apagado o sin comunicación con el variador	Variador no da respuesta, lanza error de operación	Protección del variador se puede dañar y debe ser reemplazada. Daño permanente a los motores a pasos puesto que trabajan fuera del rango de operación
				2	Herramienta de corte inapropiada	Sin avance, sobrecalentamiento de los motores a pasos	
				3	Material no es aluminio y no tiene propiedades similares	Sin avance, sobrecalentamiento de los motores a pasos	
		2	Corte no fluido	1	Unión eléctrica insuficiente para el variador (220 Volts AC)	Variador dispara protección, lanza error de alimentación	Daños en el producto final, pérdida de precisión en los cortes. Protección del variador se puede dañar y debe ser reemplazada. Daño permanente a los motores a pasos puesto que trabajan fuera del rango de operación
				2	Herramienta de corte desafilada	Avance forzado, sobrecalentamiento de los motores a pasos	
				3	Material no es aluminio pero tiene propiedades similares	Avance forzado, sobrecalentamiento de los motores a pasos	
1	Bombear agua al motor espiga (spindle) a un caudal de 3200 litros por hora y a una altura de 3 metros	1	No hay bombeo de agua	1	No hay suministro de agua	No hay paso de agua, motor espiga se sobrecalienta, Bomba de agua se sobrecalienta	Daños permanentes a la bomba de agua y al motor tipo espiga
				2	Bomba apagada	No hay paso de agua, motor espiga se sobrecalienta	
				3	Bomba dañada	No hay paso de agua, motor espiga se sobrecalienta	
		2	Hay bombeo pero el motor espiga se sobrecalienta	1	Filtro de la bomba obstruido	Flejo de agua intermitente, motor espiga se sobrecalienta	Daños progresivos a la bomba de agua y al motor tipo espiga
				2	Fuga de agua por las mangueras de transporte	Bomba de agua se sobrecalienta para cumplir con la demanda	
				3	Fuga de agua por el tanque de captación	Bomba de agua se sobrecalienta	

Figura C.2: Primera Sección RCM. Funciones dos y tres. Fuente: elaboración propia

4	Aspirar las partículas finas (o virutas) que deja el maquinado del material	1	No hay succión	1	Bomba de aire dañada	Se depositan partículas finas a los dispositivos electrónicos, motores y a la herramienta de corte	Daños permanentes a los controladores, sensores y actuadores con sus respectivos dispositivos mecánicos. Motores se pueden trabar y ventilador del computador se puede detener ocasionando sobrecalentamiento del equipo y daños permanentes
				2	Dispositivo de succión apagado	Se depositan partículas finas a los dispositivos electrónicos, motores y a la herramienta de corte	
				3	Unión eléctrica insuficiente para el dispositivo (110 Volts AC)	Se depositan partículas finas a los dispositivos electrónicos, motores y a la herramienta de corte	
		2	Succión con menor intensidad de la especificada	1	Mangueras de transporte obstruidas	Se depositan partículas finas a los dispositivos electrónicos, motores y a la herramienta de corte	Daños progresivos a los controladores, sensores y actuadores con sus respectivos dispositivos mecánicos. Motores se pueden trabar y ventilador del computador se puede detener ocasionando sobrecalentamiento del equipo y daños permanentes
				2	Filtro completamente cubierto o recipiente de captación lleno	Bomba de succión se sobrecalienta para cumplir con la operación	
				3	Fuga de aire por las mangueras de transporte	Bomba de succión se sobrecalienta para cumplir con la operación	
1	Transmitir potencia a los tornillos de bolas para generar movimiento lineal	1	No hay transmisión de potencia	1	Motor a pasos sin comunicación con el driver de micro paso	Motor y tornillo de bolas se mantienen estáticos	No hay movimiento en el carro, incumplimiento de la demanda de productos
				2	Scople de tornillo y motor dañado o unido de forma incorrecta	Motor gira pero el scople no transmite el movimiento al tornillo	
				3	Motor a pasos dañado	Motor y tornillo de bolas se mantienen estáticos	
		2	Transmisión de potencia insuficiente, movimiento es poco perceptible	1	Driver no entrega suficiente corriente al motor a pasos	Giro del motor es muy lento y no motor no entrega suficiente torque	No hay movimiento en el carro, incumplimiento de la demanda de productos, daños permanentes al scople y al motor a pasos.
				2	Tensión eléctrica insuficiente para el driver (36 Volts DC)	Driver dispara su protección y hay movimiento porque se terminan de descargar los capacitores.	
				3	Motor a pasos no trabaja a condiciones nominales	Sobrecalentamiento del motor a pasos	

Figura C.3: Primera Sección RCM. Funciones cuatro y cinco. Fuente: elaboración propia



# Programa Mantenimiento Preventivo

<div> <div>SISTEMA</div> <div>Router CNC MOFUSA</div> </div>									
<div>Subsistema</div>									
# Consecutivo	Acción proactiva	Frecuencia						Tiempo estimado tarea	
		Semanal	Mensual	Bimensu	Trimestr	Semestr	Anual	Minutos	Horas
		52	12	6	4	2	1		
111	Desenergizar el sistema desde el disyuntor en el centro de carga. Revisar conexiones entre alimentación eléctrica, variador y motor espiga. Cerciorarse que no existan cables quebrados y que todos los cables se encuentren sujetos a sus respectivas terminales			x				0	1
112	Asegurarse de tener las herramientas de corte apropiadas para MDF y para cada operación. Fresas de corte V, rectas, cónicas, de bola.				x			10	0
113	Cerciorarse de tener en inventario suficientes láminas de MDF para maquinar. No maquinar si solo se cuenta con una lámina		x					5	0
121	Medir valor de tensión en la toma de energía eléctrica (220 Volts AC)				x			20	0
122	Cambiar herramienta de corte por una de la misma marca y de las mismas características				x			20	0
123	Verificar que el material que será maquinado es MDF. Si no se tiene MDF entonces no proceder a la manufactura.	x						5	0

Figura C.4: Segunda Sección RCM. Acción proactiva uno, parte uno. Fuente: elaboración propia

	Realizado por:		Sebastián Obando Castro				
	Fecha: 28/06/2019		Versión 1.1				

Mano de obra requerida y costo estimado con cargas sociales (C)						Costo Anual
Electromecánico			Electrónico			
Cantidad	Costo/h	Total	Cantidad	Costo/hor	Total	
1	13530,38	13530,38				81182,28
1	13530,38	2255,06				9020,25
1	13530,38	1127,53				13530,38
1	13530,38	4510,13				18040,50667
1	13530,38	4510,13				18040,51
1	13530,38	1127,53				58631,65

**Figura C.5:** Segunda Sección RCM. Acción proactiva uno, parte dos. Fuente: elaboración propia

123	Verificar que el material que será maquinado es MDF. Si no se tiene MDF entonces no proceder a la manufactura.	x						5	0
211	Revisar conexiones entre variador y motor espiga. Además verificar la conexión entre alimentación eléctrica, variador y motor espiga. Cerciorarse que no existan cables quebrados y que todos los cables se encuentren sujetos a sus respectivas terminales				x			20	0
212	Asegurarse de tener las herramientas de corte apropiadas para aluminio AA 6061 y para cada operación. Fresas de corte V, rectas, cónicas, de bola.				x			10	0
213	Cerciorarse de tener en inventario suficientes láminas de aluminio AA 6061 para maquinar. No maquinar si solo se cuenta con una lámina		x					5	0
221	Medir valor de tensión en la toma de energía eléctrica (220 Volts AC)				x			30	0
222	Cambiar herramienta de corte por una de la misma marca y de las mismas características			x				20	0
223	Verificar que el material que será maquinado es aluminio AA 6061. Si no se tiene aluminio AA 6061 entonces no proceder a la manufactura.	x						20	0

**Figura C.6:** Segunda Sección RCM. Acción proactiva dos, parte uno. Fuente: elaboración propia

1	13530,38	<b>4510,13</b>				<b>18040,51</b>
1	13530,38	<b>2255,06</b>				<b>9020,25</b>
1	13530,38	<b>1127,53</b>				<b>13530,38</b>
1	13530,38	<b>6765,19</b>				<b>27060,76</b>
1	13530,38	<b>4510,13</b>				<b>27060,76</b>
1	13530,38	<b>4510,13</b>				<b>234526,59</b>

**Figura C.7:** Segunda Sección RCM. Acción proactiva uno, parte dos. Fuente: elaboración propia

311	Revisar que la llave de paso del agua se encuentre abierta y en buen estado(sin golpes o fisuras). Dejar correr el agua para conocer que no existen efectos no deseados como flujo nulo debido a obstrucciones			x				10	0
312	Medir valor de tensión en la toma de energía eléctrica (220 Volts AC)				x			30	0
313	Reemplazar bomba de agua por una de las mismas características. Altura máxima 3,2 m, Caudal 3200 L/h, alimentación 220 Volts							0	2
321	Desenergizar todo el sistema desde el disyuntor en el centro de cargar. Abrir tanque de captación de agua, sacar la bomba y limpiar filtro de la bomba de agua. Depositar los desechos en un basurero		x					40	0
322	Reemplazar manguera de transporte por una de las mismas características(diámetro, longitud y material)							0	1
323	Verificar que el tanque de captación de agua no tenga fugas cambiando el agua y asegurandose que la bomba de agua siempre quede 50 mm por debajo de la superficie del agua	x						30	1

**Figura C.8:** Segunda Sección RCM. Acción proactiva tres, parte uno. Fuente: elaboración propia

1	13530,38	<b>2255,06</b>				<b>13530,38</b>
1	13530,38	<b>6765,19</b>				<b>27060,76</b>
1	13530,38	<b>27061</b>				<b>27061</b>
1	13530,38	<b>9020,25</b>				<b>108243,04</b>
1	13530,38	<b>13530</b>				<b>13530</b>
1	13530,38	<b>20296</b>				<b>1055369,64</b>

**Figura C.9:** Segunda Sección RCM. Acción proactiva tres, parte dos. Fuente: elaboración propia

411	Reemplazar dispositivo de succión por uno de las misma características							0	1
412	Revisar la toma de energía midiendo la tensión eléctrica (110 Volts AC) y luego encender el interruptor del dispositivo de succión	x						40	0
413	Revisar la toma de energía midiendo la tensión eléctrica (110 Volts AC)				x			40	0
421	Desenergizar el sistema desconectándolo desde la toma de corriente. Desacoplar las mangueras de transporte, buscar obstrucciones y removerlas. Depositar los desechos en un basurero	x						0	1
422	Desenergizar el sistema desconectándolo desde la toma de corriente. Abrir el dispositivo de succión, remover y limpiar el filtro de la bomba de aire y vaciar recipiente de captación. Depositar los desechos en un basurero	x						40	0
423	Reemplazar manguera de transporte por una de la misma marca y mismas características compatibles con el modelo del dispositivo de succión							15	0

**Figura C.10:** Segunda Sección RCM. Acción proactiva cuatro, parte uno. Fuente: elaboración propia

1	13530,38	<b>13530</b>				<b>13530</b>
1	13530,38	<b>9020,25</b>				<b>36081,01</b>
1	13530,38	<b>9020</b>				<b>36081,01333</b>
1	13530,38	<b>13530</b>				<b>703579,76</b>
1	13530,38	<b>9020,25</b>				<b>469053,17</b>
1	13530,38	<b>3382,60</b>				<b>3382,60</b>

**Figura C.11:** Segunda Sección RCM. Acción proactiva cuatro, parte dos. Fuente: elaboración propia

511	Apagar desde el centro de carga. Revisar conexiones entre alimentación eléctrica, motor a pasos y driver de micro pasos. Cerciorarse que no existan cables quebrados y que todos los cables se encuentren sujetos a sus respectivas terminales				x			0	1
512	Verificar que el acople no se encuentre separado o fisurado				x			40	0
513	Proceder a reemplazar el motor a pasos por uno de las mismas características(Longitud del eje, torque máximo y corriente nominal máxima)							0	2
521	Medir valor de corriente a la salida del driver de micro pasos (2,4 Ampers DC)				x			20	0
522	Medir valor de tensión de salida de la fuente de poder y tensión de entrada del driver de micropasos (36 Volts DC)				x			20	0
523	Dirigirse a la configuración del driver del micro pasos y verificar que los interruptores se encuentren configurados para entregar 2,4 Ampers DC y aumentar giro por 10 micropasos ante cada revolución				x			0	1
<b>Total Anual</b>									

**Figura C.12:** Segunda Sección RCM. Acción proactiva cinco, parte uno. Fuente: elaboración propia

			1	11471,53	<b>11472</b>	<b>45886,12</b>
1	13530,38	<b>9020,25</b>				<b>36081,01</b>
1	13530,38	<b>27061</b>				<b>27061</b>
			1	11471,53	<b>3823,84</b>	<b>15295,37</b>
			1	11471,53	<b>3823,84</b>	<b>15295,37</b>
			1	11471,53	<b>11472</b>	<b>45886,12</b>
		<b>223251,27</b>			<b>30590,75</b>	<b>3219692</b>

**Figura C.13:** Segunda Sección RCM. Acción proactiva cinco, parte dos. Fuente: elaboración propia



## C.1 Lista de salarios 2019 según MTSS

Para consultar la lista de salarios con mayor detalle, dirigirse al siguiente enlace:

<http://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/Documentos-Salarios/ListaSalarios2019.pdf>

Acomodador (cines, teatros, etc.)	TONC	\$	10.358,55	Dealer (Distribuidor de cartas)	TONC	\$	10.358,55	Hojalatero	TOC	\$	11.471,53
Acompañante en buseta escolar	TONC	\$	10.358,55	Demostador (Display)	TONC	\$	10.358,55	Horneador (Horno Electrónico program.)	TOSCG	\$	11.264,17
Agente de Aduana o Vapores	TOES	\$	20.997,77	Demostador-Vendedor	TOSG	\$	11.264,17	Hornero	TOC	\$	11.471,53
Agente de Ventas *	TOCG	\$	349.623,39	Dependiente	TOSG	\$	11.264,17	Instructor de Bailes Populares	TOC	\$	11.471,53
Albani	TOC	\$	11.471,53	Despachador Agencia Aduana, Vapores	TOE	\$	13.530,38	Jardinero (Crear Jardines)	TOC	\$	11.471,53
Alistador Automotriz (Iijador)	TOSC	\$	11.264,17	Diagramador en Artes Gráficas	TOE	\$	13.530,38	Jefe de Cocina (Chef)	TOE	\$	13.530,38
Aplanchador (plancha tipo casera)	TONC	\$	10.358,55	Dibujante en Artes Gráficas	TOE	\$	13.530,38	Jefe de Salones (Maitre)	TOE	\$	13.530,38
Aplanchador con Equipo de Vapor	TOC	\$	11.471,53	Dibujante de Ingeniería, Arquitectura *	TOCG	\$	349.623,39	Joyer	TOC	\$	11.471,53
Analista de Crédito *	TOCG	\$	349.623,39	Digitador	TOC	\$	11.471,53	Laboratorista Civil	TOC	\$	11.471,53
Animador de Eventos	TOC	\$	11.471,53	Diplomado Para universitario *	DES	\$	487.662,29	Laboratorista Clínico	TOC	\$	11.471,53
Asistente de Abogacía *	TOEG	\$	392.623,14	Diplomado Universitario *	DES	\$	487.662,29	Laqueador (Muebles y Similares)	TOC	\$	11.471,53
Asistente de Auditoría *	DES	\$	487.662,29	Ebanista	TOE	\$	13.530,38	Lavador de Cabello	TONC	\$	10.358,55
Asistente de Consultorio Médico	TOC	\$	11.471,53	Educador Aspirante sin Título *	TOEG	\$	392.623,14	Lavador de Carros	TONC	\$	10.358,55
Asist. Domicilio/Ancianos	TOE	\$	13.530,38	Electricista	TOC	\$	11.471,53	Levantador de Texto (Artes Gráficas)	TOE	\$	13.530,38
(ciudadanos especiales)				Electromecánico	TOE	\$	13.530,38	Licenciado Universitario *	Lic.	\$	663.772,10
Auxiliar Agente de Aduana, Vapores	TOE	\$	13.530,38	Empacador, Etiquetador	TONC	\$	10.358,55	Limpiador de Tanques Sépticos	TOC	\$	11.471,53
Auxiliar de Contabilidad *	TOC	\$	349.623,39	Empleado de Despacho	TOSG	\$	11.264,17	Linotipista (Artes Gráficas)	TOC	\$	11.471,53
Auxiliar Dental	TOE	\$	13.530,38	Empleada Doméstica *	TOSG	\$	190.377,39	Liquidador Agencia Aduana, Vapores	TOE	\$	13.530,38
Ayudante de Cocina	TOSG	\$	11.264,17	Encargado (indica acomodo parqueo)	TONC	\$	10.358,55	Llantero	TOSG	\$	11.264,17
Ayudante de Mecánico general	TOSC	\$	11.264,17	Encargado de Limpieza en General	TONCG	\$	309.143,36	Locutor de Radioemisora	TOE	\$	13.530,38
Ayudante de Operario, Construcción	TOSC	\$	11.264,17	Encargado de Limpieza en Piscinas	TONC	\$	10.358,55	Locutor de Televisión	TOES	\$	20.997,77
Bachiller Universitario *	Bach	\$	553.124,45	Enc. Mantenim. Preventivo Computo	TOE	\$	13.530,38	Luminotécnico TV	TOES	\$	20.997,77
Baqueano	TOSG	\$	11.264,17	Enc. Mantenim. Preventivo Computo	TOC	\$	11.471,53	Maestro de Obras (Construcción)	TOE	\$	13.530,38
Barbero	TOC	\$	11.471,53	Encargado de poner Discos (Discokey)	TONC	\$	10.358,55	Manicurista, Maquilladora	TOC	\$	11.471,53
Barista	TOC	\$	11.471,53	Encargado de Cámaras Frigoríficas	TOSG	\$	11.264,17	Maquinista de Embarcaciones	TOC	\$	11.471,53
Bartender (Cocletera)	TOC	\$	11.471,53	Encargado Mantenimiento Edificios	TOC	\$	11.471,53	Marinero	TONC	\$	10.358,55
Bodeguero (Encargado) *	TOSCG	\$	332.589,87	Encerador de Carnos	TONC	\$	10.358,55	Masajista	TOC	\$	11.471,53
Bodeguero (Peón) *	TONCG	\$	309.143,36	Encuadernador - Empastador	TOC	\$	11.471,53	Mecánico Calderas (mantenimiento).	TOE	\$	13.530,38
Cajero *	TOCG	\$	349.623,39	Encuadernador en Fino	TOE	\$	13.530,38	Mecánico General	TOC	\$	11.471,53
Cajista de Artes Gráficas	TOE	\$	13.530,38	Encuadernador en Rústica	TOSG	\$	11.264,17	Mecánico Precisión	TOE	\$	13.530,38
Camarógrafo de Prensa	TOES	\$	20.997,77	Encuestador *	TOSCG	\$	332.589,87	Mecánico Máquinas de Coser Industrial	TOE	\$	13.530,38
Cantante de Música Popular	TOC	\$	11.471,53	Enderezador Automotriz	TOC	\$	11.471,53	Mecánico de Máquinas de hacer Telas	TOE	\$	13.530,38
Caninero	TOSC	\$	11.264,17	Engrasador de Autos	TOSC	\$	11.264,17	Mensajero *	TONCG	\$	309.143,36
Capitán de Embarcación	TOE	\$	13.530,38	Ensamblador de Computadoras	TOSC	\$	11.264,17	Misceláneo *	TONCG	\$	309.143,36
Camicero Empleado Despacho	TOSC	\$	11.264,17	Envasador Manual	TONC	\$	10.358,55	Misceláneo en Hogares Tercera Edad	TONC	\$	10.358,55
Camicero Destazador	TOC	\$	11.471,53	Esparcidor de Plaguicidas	TONC	\$	10.358,55	Montacarguista	TOSC	\$	11.264,17
Carpintero	TOC	\$	11.471,53	Estampador en Textil (Serigrafía)	TOC	\$	11.471,53	Mucama	TONC	\$	10.358,55
Cerrajero	TOC	\$	11.471,53	Esteticista	TOE	\$	13.530,38	Musicalizador en Radioemisoras	TOE	\$	13.530,38
Chapulero	TOC	\$	11.471,53	Estibador por Kilo de frutas y vegetales		\$	0,0711	Niñera, excepto en el Hogar del Niño	TONC	\$	10.358,55
Chequeador Agenc. Aduana, Vapor.	TOE	\$	13.530,38	Estibador por Movimiento		\$	375,28	Niñera en el Hogar del Niño		\$	190.377,39
Chequeador de Buses	TONC	\$	10.358,55	Estibador por Tonelada		\$	88,00	Oficial de Mesa (panadería)	TOC	\$	11.471,53
Chofer de Bus (no cobrador)	TOC	\$	11.471,53	Estilista	TOC	\$	11.471,53	Oficinista (General) *	TOSCG	\$	332.589,87
Chofer de Tráiler	TOE	\$	13.530,38	Florista	TOC	\$	11.471,53	Operador de Cabina de Radioemisora	TOE	\$	13.530,38
Chofer de Vehículo Liviano	TOSC	\$	11.264,17	Fontanero	TOC	\$	11.471,53	Operador de "Araña" (Serigrafía)	TOC	\$	11.471,53
Chofer de Vehículo Pesado	TOC	\$	11.471,53	Fotocopiador (Centro fotocopiado)	TOSC	\$	11.264,17	Operador de Camusel	TOC	\$	11.471,53
Chofer Microbús (menos de 11pasaj.)	TOSC	\$	11.264,17	Fotógrafo de Prensa	TOE	\$	13.530,38	Operador de Caldera	TOC	\$	11.471,53
Chofer-Cobrador de Bus	TOE	\$	13.530,38	Fotomecánico de Artes Gráficas	TOE	\$	13.530,38	Operador de Computación	TOE	\$	13.530,38
Cobrador de Buses	TONC	\$	10.358,55	Fotomontador (Artes Gráficas)	TOE	\$	13.530,38	Operador de Draga	TOE	\$	13.530,38
Cobrador *	TOSCG	\$	332.589,87	Fresador (Metalmeccánica)	TOE	\$	13.530,38	Operador de Grúa Estacionaria	TOE	\$	13.530,38
Cocinero	TOC	\$	11.471,53	Fumigador (Doméstica)	TOSC	\$	11.264,17	Operador de Máquina de Lavar Ropa	TOC	\$	11.471,53
Confección Muestras de Ropa	TOE	\$	13.530,38	Fundidor	TOC	\$	11.471,53	Operador de Maquinaria Pesada	TOC	\$	11.471,53
Conserje *	TONCG	\$	309.143,36	Futbolista Primera División	TOE	\$	13.530,38	Operador de Máquinas en General	TOC	\$	11.471,53
Contador Privado *	TMED	\$	366.380,40	Futbolista Segunda División	TOC	\$	11.471,53	Operador de Planta Transm. Radio	TOC	\$	11.471,53
Contador Privado *	DES	\$	487.662,29	Gondolero	TONC	\$	10.358,55	Operador de Prensa Rotativa	TOES	\$	20.997,77
Contador Privado *	Bach.	\$	553.124,45	Graduado del INA *	TMED	\$	366.380,40	Operador de Radio-Taxi	TOC	\$	11.471,53
Contador Privado *	Lic.	\$	663.772,10	Guarda *	TOSCG	\$	332.589,87	Operador de Escogedoras de Café	TOC	\$	11.471,53
Cortador de tela	TOC	\$	11.471,53	Guarda Custodio Valores-Portavalores	TOCG	\$	349.623,39	Operador Escáner separador colores	TOES	\$	20.997,77
Cosedor Piezas/Prendas a Máquina	TOC	\$	11.471,53	Guía Turístico	TOC	\$	11.471,53	Operario en Construcción	TOC	\$	11.471,53
Costurera (Modista)	TOE	\$	13.530,38	Guillotina (Guillotina Eléctrica)	TOC	\$	11.471,53	Ordeñador a Mano	TONC	\$	10.358,55
Counter (Vendedor de Pasajes) *	TOCG	\$	349.623,39	Guillotina (Electrónica programable)	TOE	\$	13.530,38				

Figura C.14: Primera parte de lista de salarios base 2019. Fuente: MTSS

Operarios de Talleres Dentales	TOC	\$ 11.471,53	Técnico Reparación Audio y Video	TOES	\$ 20.997,77
Panadero	TOC	\$ 11.471,53	Técnicos en Salud *	TedS	\$ 451.523,54
Parrillero	TOSC	\$ 11.264,17	Tejedora Manual de Prendas, Muebles	TOC	\$ 11.471,53
Pastelero	TOC	\$ 11.471,53	Telefonista *	TOSCG	\$ 332.589,87
Pedimentador Aduana, Vapores	TOE	\$ 13.530,38	Tomero en Madera	TOC	\$ 11.471,53
Peinadora	TOC	\$ 11.471,53	Tomero en Metal	TOE	\$ 13.530,38
Peón Agrícola	TONC	\$ 10.358,55	Tractorista (Oruga o Llanta)	TOC	\$ 11.471,53
Peón de Bodegas Frías	TOC	\$ 11.471,53	Tramitador - Abridor Aduanal	TOSC	\$ 11.264,17
Peón de Camión Distribuidor	TONC	\$ 10.358,55	Vagonetero	TOC	\$ 11.471,53
Peón de Carga y Descarga	TONC	\$ 10.358,55	Verdadero	TOSC	\$ 11.264,17
Peón de Construcción	TONC	\$ 10.358,55	Zapatero	TOC	\$ 11.471,53
Peón de Jardín	TONC	\$ 10.358,55			
Peón en General	TONC	\$ 10.358,55			
Periodista *		\$ 817.500,41			
Pilero (Lavador de Platos)	TONC	\$ 10.358,55			
Pintor Automotriz	TOE	\$ 13.530,38			
Pintor de Brocha Gorda	TOC	\$ 11.471,53			
Pistero	TOSC	\$ 11.264,17			
Pizzero (Cocina Pizzas Preparadas)	TOSC	\$ 11.264,17			
Portero *	TONCG	\$ 309.143,36			
Prentista de Artes Gráficas	TOE	\$ 13.530,38			
Preparador documentos, Ag. Aduana	TOE	\$ 13.530,38			
Programador de Computación	TOE	\$ 13.530,38			
Programador en Radioemisoras	TOE	\$ 13.530,38			
Proveedor *	TOCG	\$ 349.623,39			
Quemador de Marcos (Serigrafía)	TOC	\$ 11.471,53			
Quemador de Planchas	TOE	\$ 13.530,38			
Recamarera	TONC	\$ 10.358,55			
Recepcionista *	TOSCG	\$ 332.589,87			
Reclutador de docu, Ag. Aduana	TOE	\$ 13.530,38			
Recolectores de Café Cajuela		\$ 986,27			
Relojero	TOC	\$ 11.471,53			
Repartidor de Cargas Livianas	TONC	\$ 10.358,55			
Repartidor-Propagandista	TONC	\$ 10.358,55			
Repostero	TOC	\$ 11.471,53			
Sabonero	TONC	\$ 10.358,55			
Salonero	TONC	\$ 10.358,55			
Sastre (Prendas a la Medida)	TOE	\$ 13.530,38			
Secretaria *	TOCG	\$ 349.623,39			
Secretaria*	TMED	\$ 366.380,40			
Secretaria*	DES	\$ 487.662,29			
Secretaria*	Bach	\$ 553.124,45			
Secretaria*	Lic.	\$ 663.772,10			
Sellista (Artes Gráficas)	TOC	\$ 11.471,53			
Servicio Doméstico *		\$ 190.377,39			
Soldador (Soldaduras Especiales)	TOE	\$ 13.530,38			
Soldador en General	TOC	\$ 11.471,53			
Tapicero	TOC	\$ 11.471,53			
Tatuador	TOC	\$ 11.471,53			
Taxista	TOC	\$ 11.471,53			
Técnico de Educación Superior *	TedS	\$ 451.523,54			
Técnico en Aire Acondicionado	TOC	\$ 11.471,53			
Técnico en Aparatos Ortopédicos	TOES	\$ 20.997,77			
Técnico en Lentes de Contacto	TOES	\$ 20.997,77			
Téc. Refrigeración Doméstica-Indus.	TOES	\$ 20.997,77			
Técnico en Registros Médicos *	TOCG	\$ 349.623,39			
Técnico Mq. Coser Ind. Especiales	TOES	\$ 20.997,77			
Técnico Medio Educ. Diversificada *	TMED	\$ 366.380,40			

Estos salarios contienen un incremento del **2.96 %** para todas las categorías del Decreto en relación con los salarios mínimos del periodo anterior excepto para el servicio doméstico ya que se otorgó un **3.50 %**.

Para efectos de los Salarios Mínimos el instrumento para la clasificación de ocupaciones son los Perfiles Ocupacionales aprobados por el Consejo Nacional de Salarios. De conformidad con ellos se ha elaborado esta guía ilustrativa que contiene algunas ocupaciones clasificadas por Personal Técnico del Departamento de Salarios, en el entendido de que se basan en las tareas típicas conocidas, por lo que un puesto determinado podría tener una clasificación distinta según sus características y responsabilidades específicas.

#### Para consultas laborales:

llamar gratuitamente:  
**800 -TRABAJO (800-872-2256)**

ó al **CHAT INSTITUCIONAL** por medio de  
[www.mtss.go.cr](http://www.mtss.go.cr)

**CONSULTAS DE SALARIOS AL CORREO:**  
[consulta.salarios@mtss.go.cr](mailto:consulta.salarios@mtss.go.cr)  
[salario.minimo@mtss.go.cr](mailto:salario.minimo@mtss.go.cr)

**ROSA ISELA  
HERNANDEZ  
RODRIGUEZ  
(FIRMA)**

Firmado digitalmente por  
ROSA ISELA HERNANDEZ  
RODRIGUEZ (FIRMA)  
Fecha: 2018.12.18  
12:26:49 -06'00'

**Documento gratuito, prohibida su  
reproducción y venta**



#### DEPARTAMENTO DE SALARIOS

Lista de ocupaciones clasificada por el personal  
técnico del Departamento

#### SALARIOS MÍNIMOS

**SECTOR PRIVADO**  
**AÑO 2019**

Decreto Nº 41434-MTSS, publicado en la Gaceta 235, del 18 de diciembre del 2018. Rige 1º de enero del 2019.

#### SIGLAS Y SALARIOS MÍNIMOS

TONC	Trabajadores en Ocupación No Calificada	\$10.358,55
TOSC	Trabajadores en Ocupación Semicalficada	\$11.264,17
TOC	Trabajadores en Ocupación Calificada	\$11.471,53
TOE	Trabajadores en Ocupación Especializada	\$13.530,38
TOES	Trabajadores de Ocupación de Especialización Superior	\$20.997,77
TONCG	Trabajadores en Ocupación No Calificada (Genérico)	\$309.143,36*
TOSCG	Trabajadores en Ocupación Semicalficada (Genérico)	\$332.589,87*
TOCG	Trabajadores en Ocupación Calificada (Genérico)	\$349.623,39*
TMED	Técnico Medio en Educación Diversificada	\$366.380,40*
TOEG	Trabajadores en Ocupación Especializada (Genérico)	\$392.623,14*
TedS	Técnico de Educación Superior	\$451.523,54*
DES	Diplomados de Educación Superior	\$487.662,29*
Bach	Bachiller Universitario	\$553.124,45*
Lic.	Licenciado Universitario	\$663.772,10*

#### \* Salario mensual.

El que no tiene ninguna indicación, está por jornada ordinaria.

Para mayor información y debido a que se han hecho circular algunas listas alteradas, se sugiere consultar personalmente en la Oficina de Salarios, en Barrio Tournon del Edif. Benjamín Núñez 50 metros sureste sobre calle paralela, Edificio Anexo, al Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, Segundo Piso.

**Teléfono: 2256 2221 Fax: 2257 4633.**

Esta lista está disponible en: [www.mtss.go.cr](http://www.mtss.go.cr)

**Figura C.15:** Primera parte de lista de salarios base 2019. Fuente: MTSS

# Apéndice D

## Planos Mecánicos

Para consultar los planos con mayor detalle, dirigirse al siguiente enlace:

<https://drive.google.com/file/d/1y9IsdjVlRcaq0w0l3wW3p2r78T4Vqml/view?usp=sharing>

	1	2	3	4	5	6	7	8
A								
	Marca	Designación	Denominación	Cantidad	Material			
			Documentación					
		AR01.00.01	Dibujo de conjunto					
		AR01.00.02	Vista explosionada					
			Piezas					
	1	AR01.01.01	Amazón	1	ASTM A-36			
	2	AR01.01.02	SBR16S 1500mm	4				
B								
	3	AR01.01.03	SBR16UU	8				
	4	AR01.01.04	SFU1610	2				
	5	AR01.01.05	BK12	2				
	6	AR01.01.06	BF12	2				
	7	AR01.01.07	RM1610	2				
C								
	8	AR01.01.08	SBR12S 400mm	2				
	9	AR01.01.09	SBR12UU	1				
	10	AR01.01.10	SFU1204	1				
	11	AR01.01.11	BK10	1				
	12	AR01.01.12	BF10	1				
D								
	13	AR01.01.13	RM1204	1				
	14	AR01.01.14	GDZ-80-2.2A	1				
	15	AR01.01.15	Abrazadera para GDZ-80-2.2A	1				
E								
	16	AR01.01.16	23hs2430b	3				
	17	AR01.01.17	Espaciador para 23hs2430b Eje Y	1	MDF			
	18	AR01.01.18	Base para 23hs2430b Eje Y	1	AISI 304			
F								

	1	2	3	4	5	6	7	8
A								
	Marca	Designación	Denominación	Cantidad	Material			
			Piezas					
	19	AR01.01.19	Base para 23hs2430b Eje X	1	AISI 304			
	20	AR01.01.20	Base para 23hs2430b Eje Z	1	AISI 304			
	21	AR01.01.21	Placa 1 Eje Z	1	Fundición de aluminio			
	22	AR01.01.22	Placa 2 Eje Z	1	Fundición de aluminio			
	23	AR01.01.23	Soporte para fuerza de bolas Eje Z	1	Fundición de aluminio			
	24	AR01.01.24	Mufonera para RM1610	1	Fundición de aluminio			
	25	AR01.01.25	Mufonera para RM1204	1	Fundición de aluminio			
	26	AR01.01.26	Carró	1	ASTM A-36			
	27	AR01.01.27	Soporte para carró	2	AISI 304			
	28	AR01.01.28	Soporte para mufonera para RM1610	1	AA 6061			
	29	AR01.01.29	Base para BK12-Eje Y	1	AISI 304			
	30	AR01.01.30	Base para BF12-Eje Y	1	AISI 304			
	31	AR01.01.31	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 20 Hex SHCS - 20NHX	10				
B								
C								
D								
E								
F								

<b>TEC</b> Tecnológico de Costa Rica				AREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECÁNICA		Proyecto final de graduación	<b>A</b>
NOMBRE: C. CARRERA: PROFESOR: ASISTENTE:	TÍTULO: C. CARRERA: PROFESOR: ASISTENTE:	NOMBRE: C. CARRERA: PROFESOR: ASISTENTE:	NOMBRE: C. CARRERA: PROFESOR: ASISTENTE:	<b>Conjunto Mecánico</b>			
INSTITUCIÓN EDUCATIVA: CENTRO DE INVESTIGACIÓN: LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN:				TÍTULO: C. CARRERA: PROFESOR: ASISTENTE:	NOMBRE: C. CARRERA: PROFESOR: ASISTENTE:	INSTITUCIÓN: CENTRO DE INVESTIGACIÓN: LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN:	INSTITUCIÓN: CENTRO DE INVESTIGACIÓN: LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN:

**Licencia educacional de SOLIDWORKS**  
**Sólo para uso académico.**

Figura D.1: Planos mecánicos. Hoja 1 de 13. Fuente: elaboración propia

**Figura D.2:** Planos mecánicos. Hoja 2 de 13. Fuente: elaboración propia

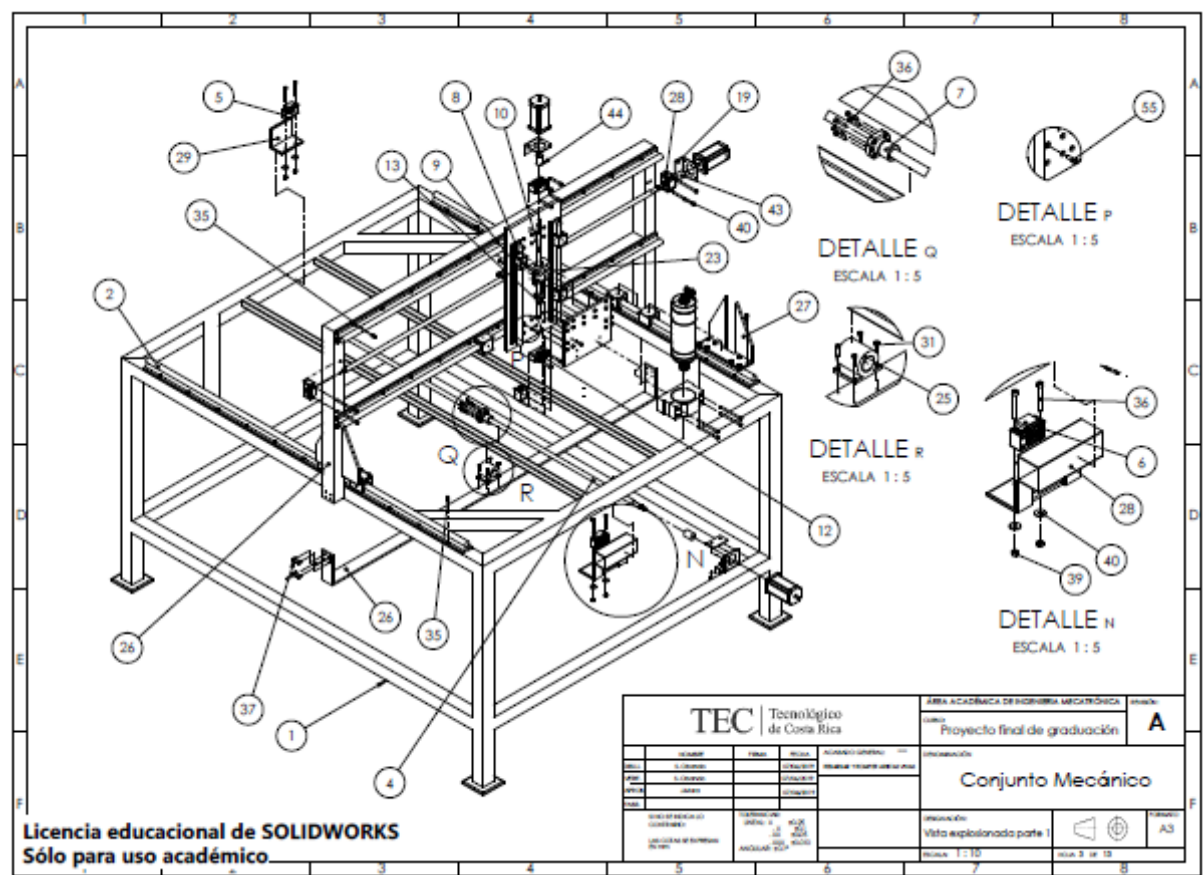
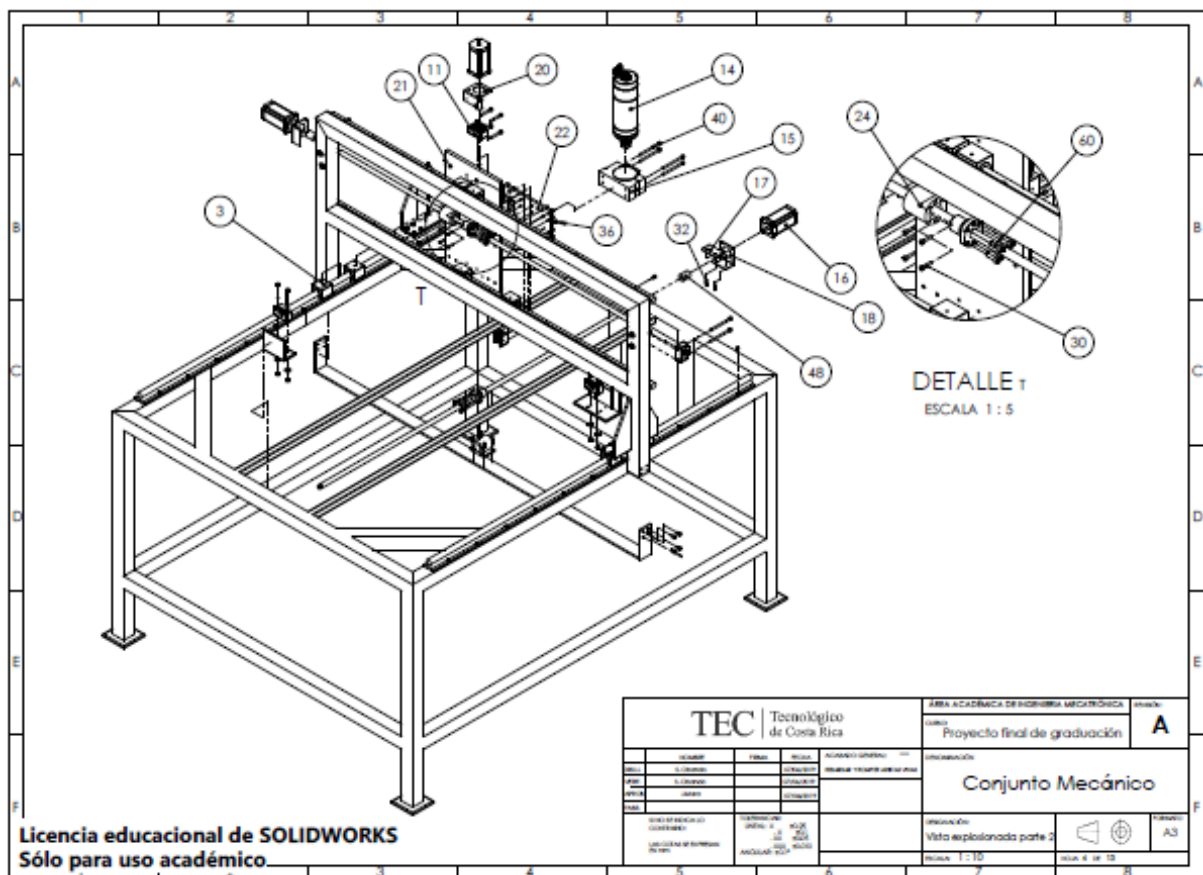


Figura D.3: Planos mecánicos. Hoja 3 de 13. Fuente: elaboración propia





**Figura D.4:** Planos mecánicos. Hoja 4 de 13. Fuente: elaboración propia

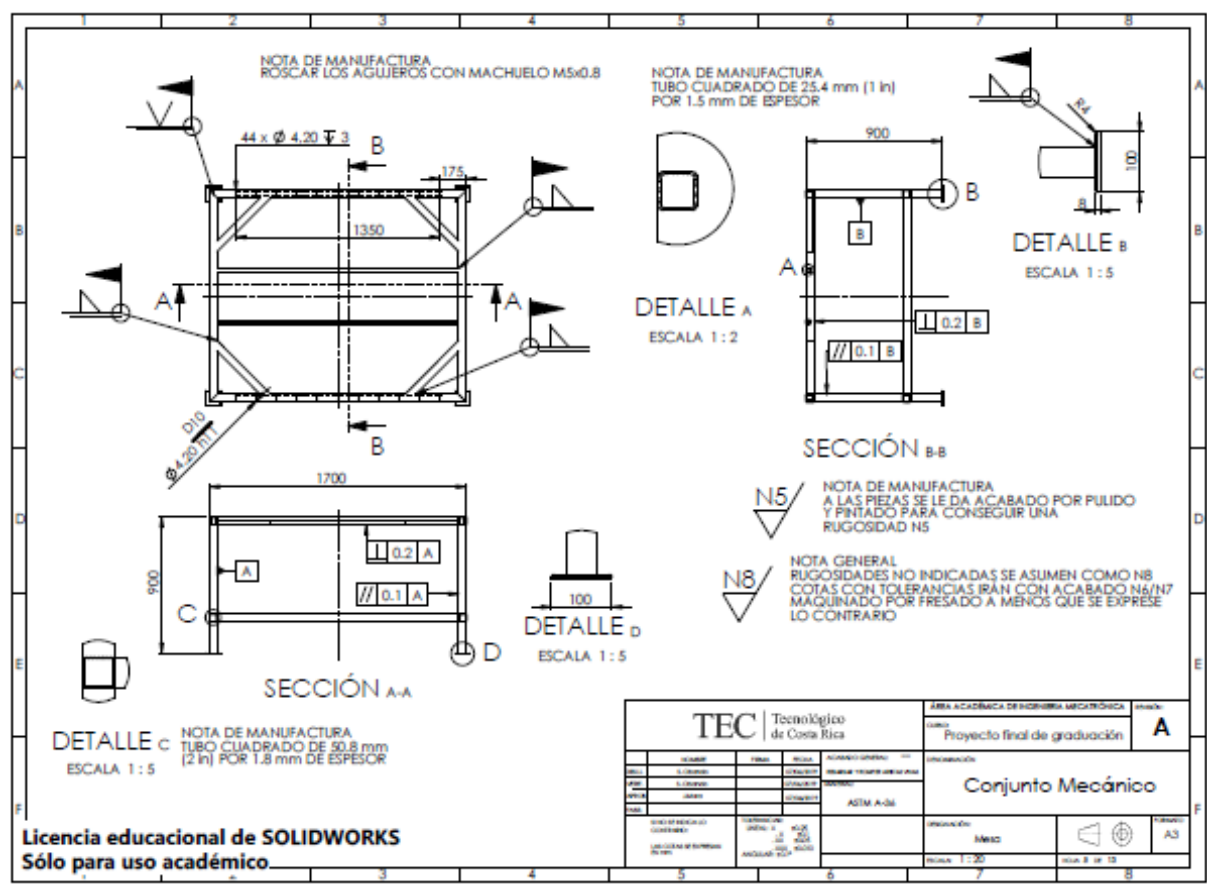


Figura D.5: Planos mecánicos. Hoja 5 de 13. Fuente: elaboración propia

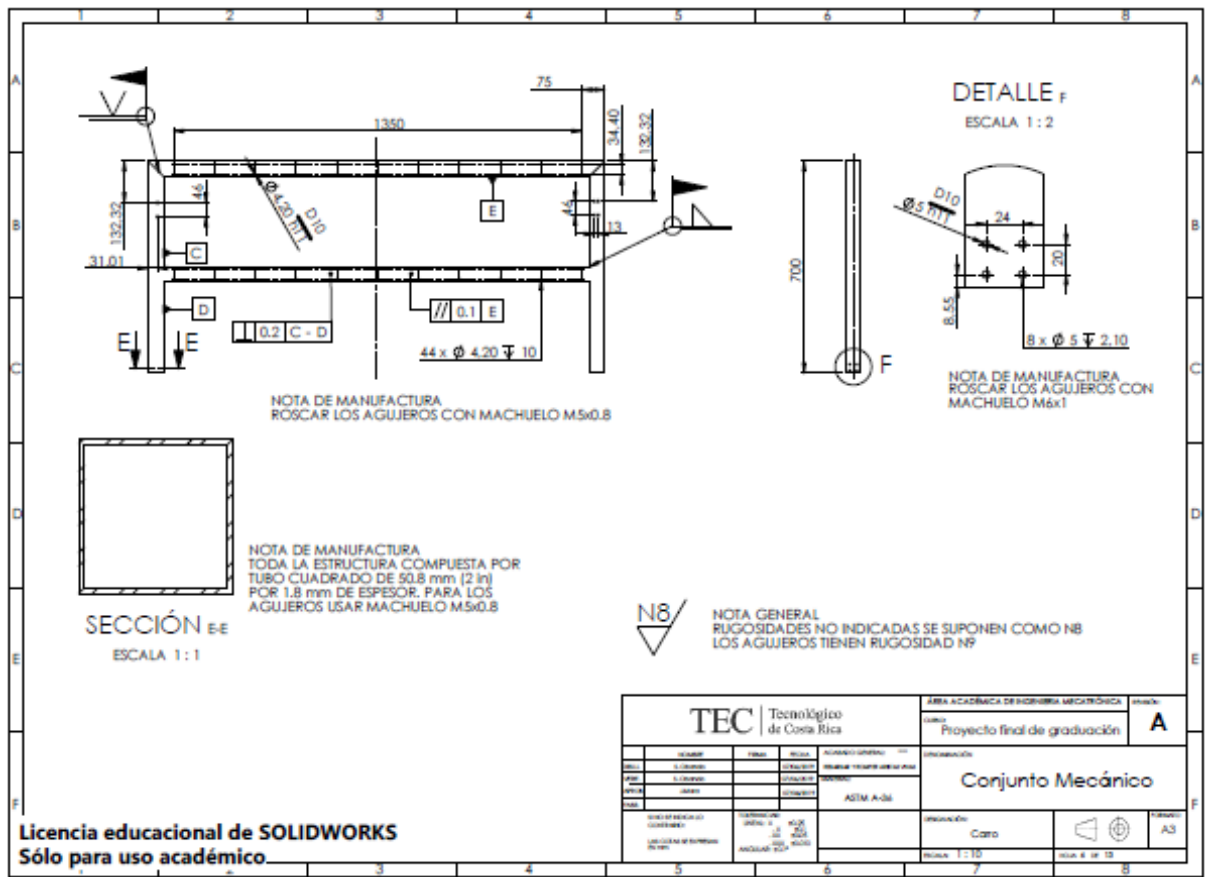


Figura D.6: Planos mecánicos. Hoja 6 de 13. Fuente: elaboración propia



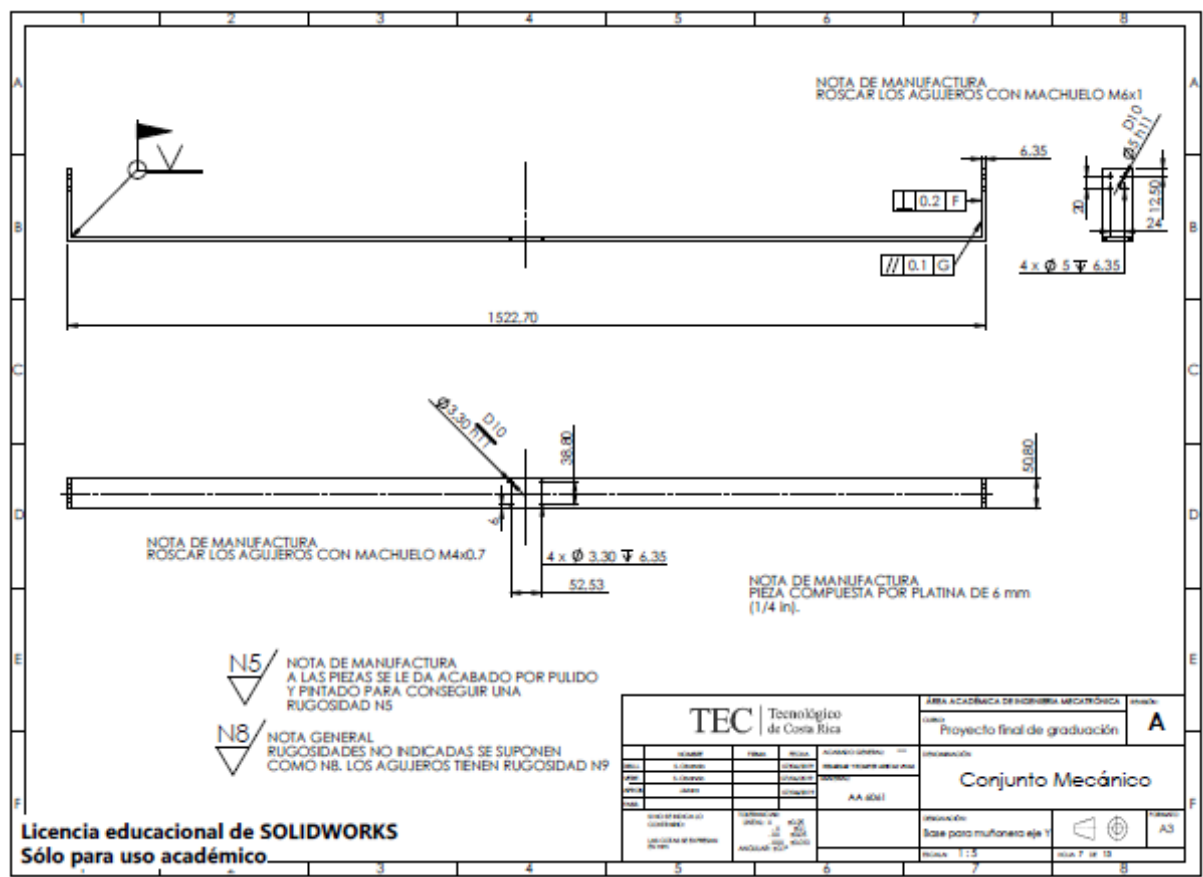
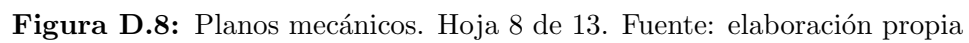


Figura D.7: Planos mecánicos. Hoja 7 de 13. Fuente: elaboración propia



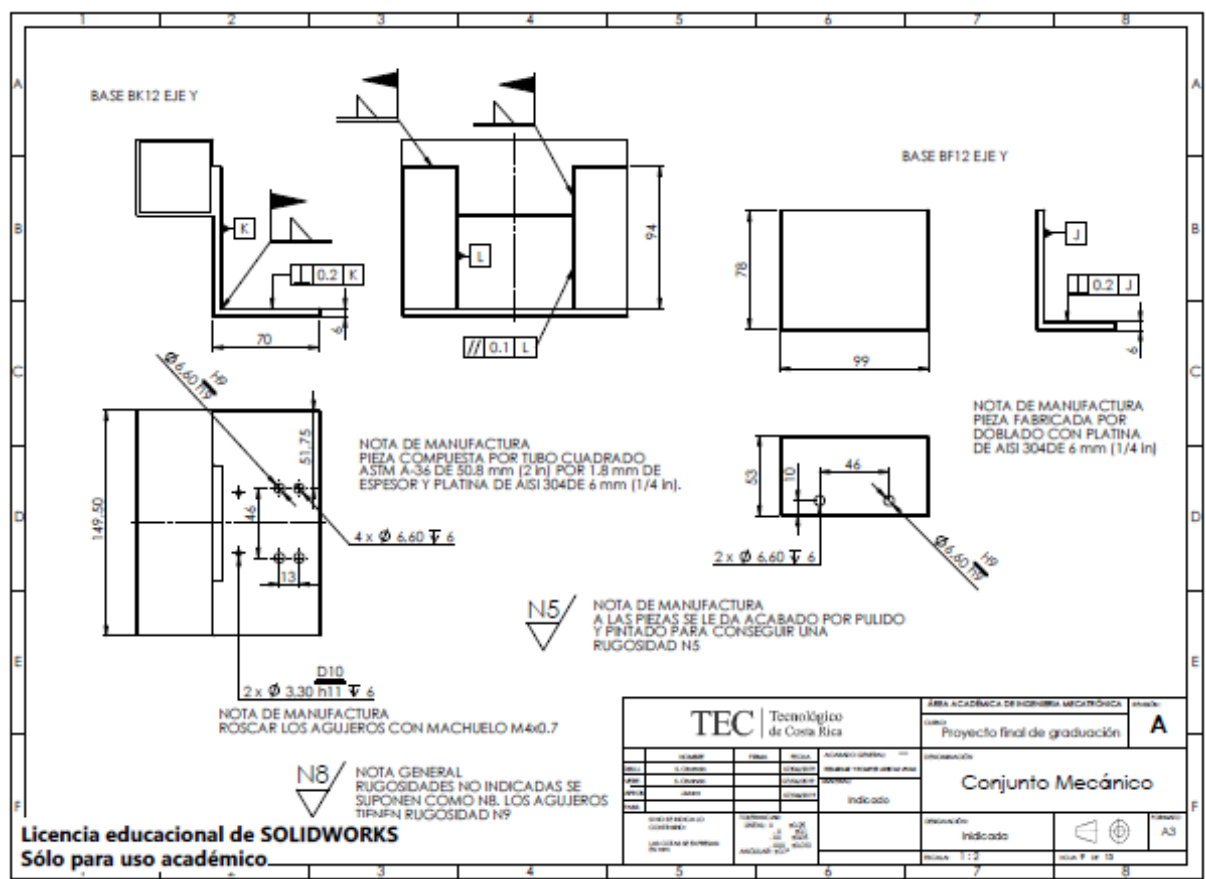


Figura D.9: Planos mecánicos. Hoja 9 de 13. Fuente: elaboración propia

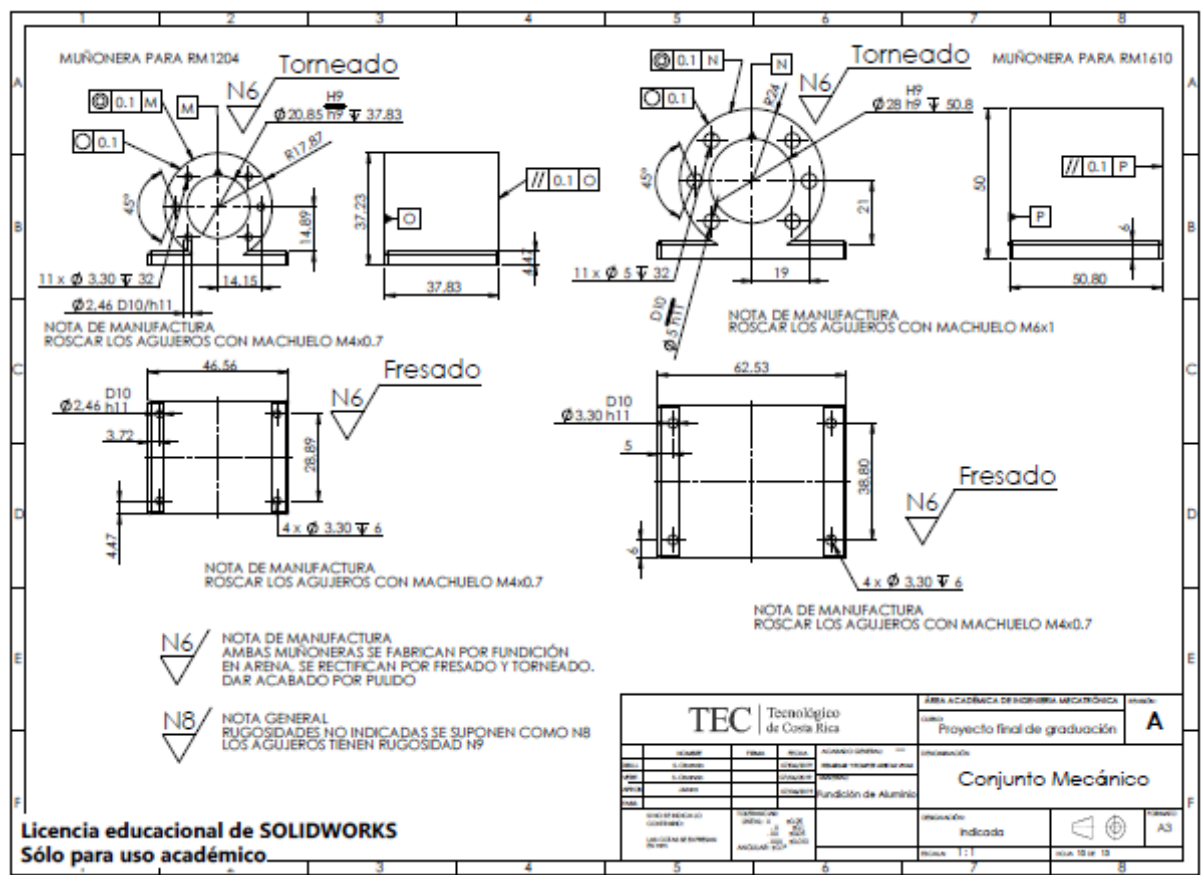


Figura D.10: Planos mecánicos. Hoja 10 de 13. Fuente: elaboración propia

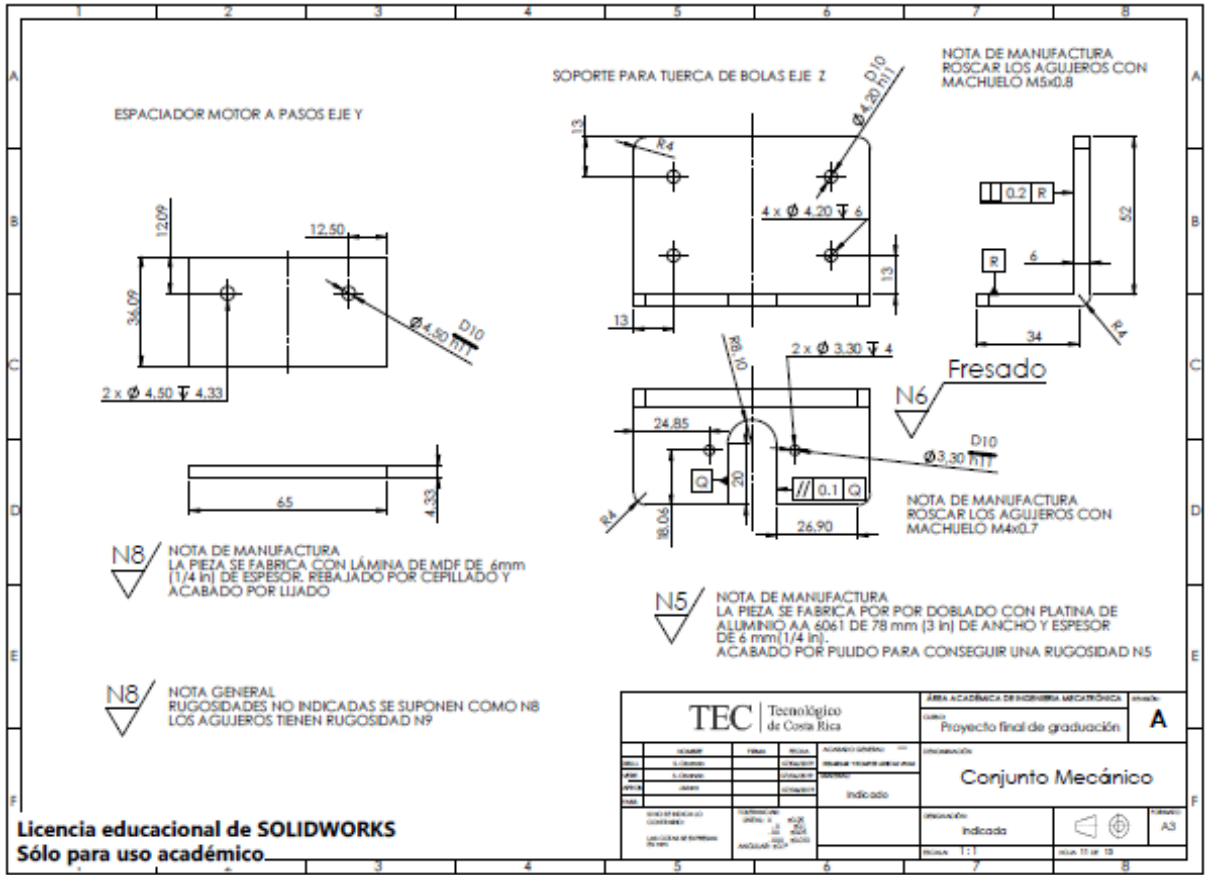
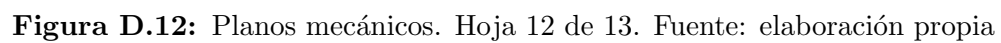


Figura D.11: Planos mecánicos. Hoja 11 de 13. Fuente: elaboración propia



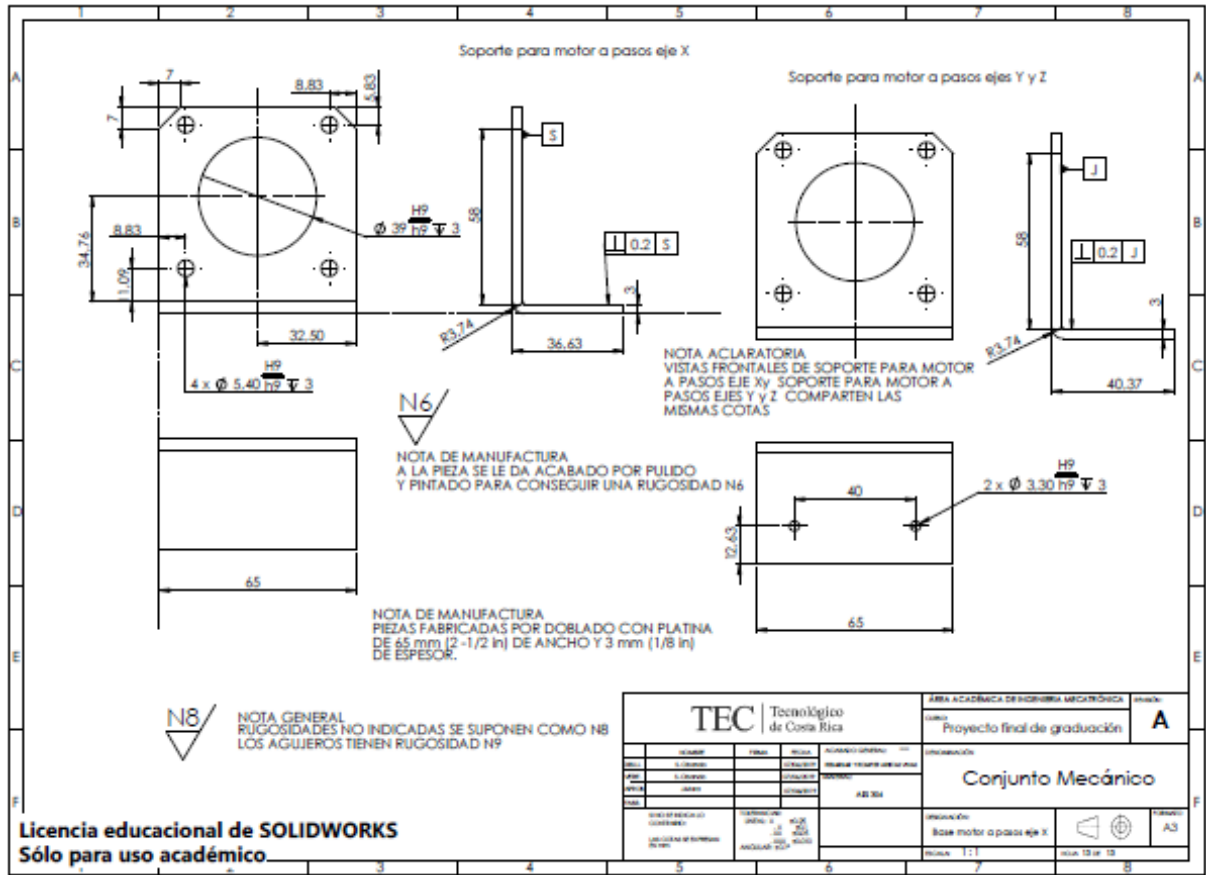


Figura D.13: Planos mecánicos. Hoja 13 de 13. Fuente: elaboración propia



# Herramienta para estimación de torque para los motores a pasos

Operating Speed  $N_m$  [r/min]

$t_1$   $t_0$   $t_1$

Using Brushless Motors

**Figura E.1:** Estimación de torque para eje X. Fuente: elaboración propia

CALCULOS		
Resolucion requerida	55319,1489 deg	
Pulsos en la operación	0,61538462 pulsos	determinado por el desplazamiento medio
Tiempo aceleracion	0,225 s	es el 25% del tiempo de posicionamiento
Velocidad de pulso en operación	0,91 Hz	
Velocidad de operación	8405,57 R/min	
Fuerza de movimiento	1012,2625 N	
Torque de carga	0,82577 N/m	
momento inercia tornillo	5,588E-05 Kgm2	
Inercia de la tabla y la carga	1,13E-05 Kgm2	
Inercia total	6,72E-05 Kgm2	
Torque de aceleracion	0.5014 Nm	

**Figura E.2:** Estimación de torque para eje X. Fuente: elaboración propia

Meter este valor desde la tabla del proveedor para el calculo ---->				Inercia motor	6,10E-05 Kg/m2	Seleccionado de la tabla del fabricante
					3,34E+00 oz in2	Si gcm2 -> multiplicar por 1e-7 para kg/m2
Torque en punto de funcionamiento (r/min seleccionadas)				2,654 Nm		Factor de seguridad 2
					375,88 oz in	

**Figura E.3:** Estimación de torque para eje X. Fuente: elaboración propia.



<b>CALCULOS</b>		
Resolucion requerida	64462,8099 deg	
Pulsos en la operación	0,04615385 pulsos	determinado por el desplazamiento medio
Tiempo aceleracion	0,225 s	es el 25% del tiempo de posicionamiento
Velocidad de pulso en operación	0,07 Hz	
Velocidad de operación	734,62 R/min	
Fuerza de movimiento	1012,2625 N	
Torque de carga	0,70864 N/m	
momento inercia tornillo	2,411E-06 Kgm2	
Inercia de la tabla y la carga	8,35E-06 Kgm2	
Inercia total	1,08E-05 Kgm2	
Torque de aceleracion	0,0245 Nm	

**Figura E.8:** Estimación de torque para eje Z. Fuente: elaboración propia

Meter este valor desde la tabla del proveedor para el calculo ---->				<b>Inercia motor</b>	<b>6,10E-05 Kg/m2</b>	Seleccionado de la tabla del fabricante
					3,34E+00 oz in2	Si gcm2 -> multiplicar por 1e-7 para kg/m2
<b>Torque en punto de funcionamiento (r/min seleccionadas)</b>					<b>1,466 Nm</b>	Factor de seguridad 2
					207,65 oz in	

**Figura E.9:** Estimación de torque para eje Z. Fuente: elaboración propia

## Apéndice F

### Imágenes Varias del progreso de la máquina



**Figura F.1:** Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia

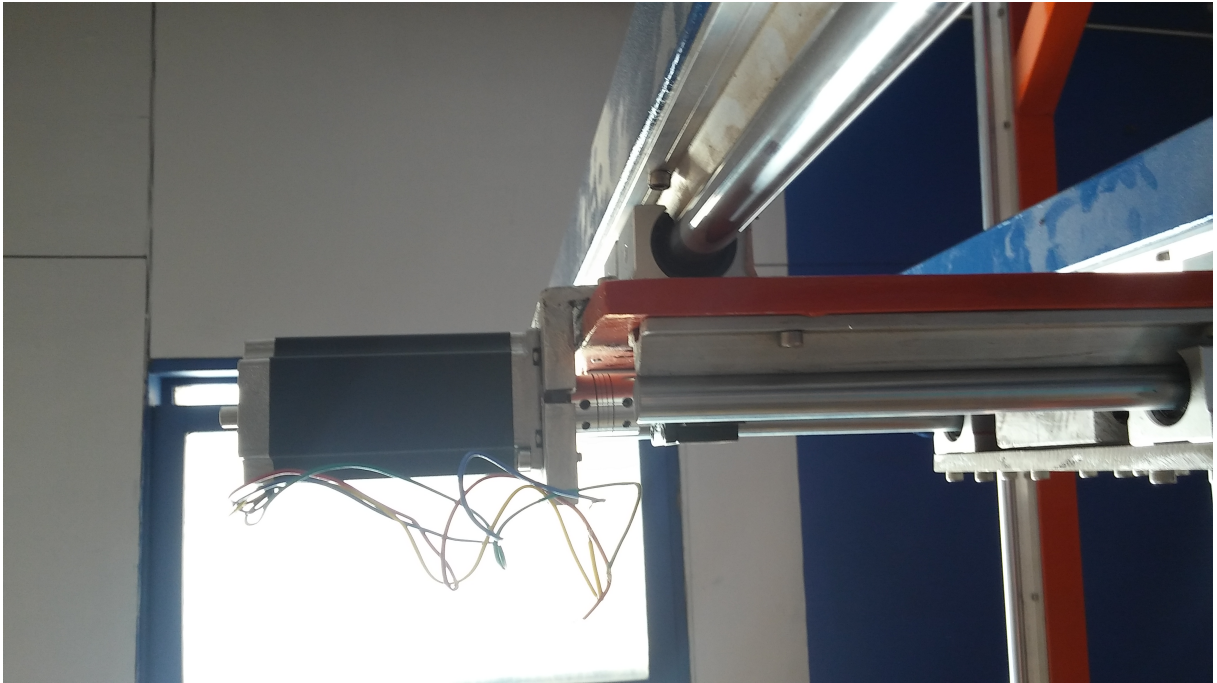


**Figura F.2:** Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia



**Figura F.3:** Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia





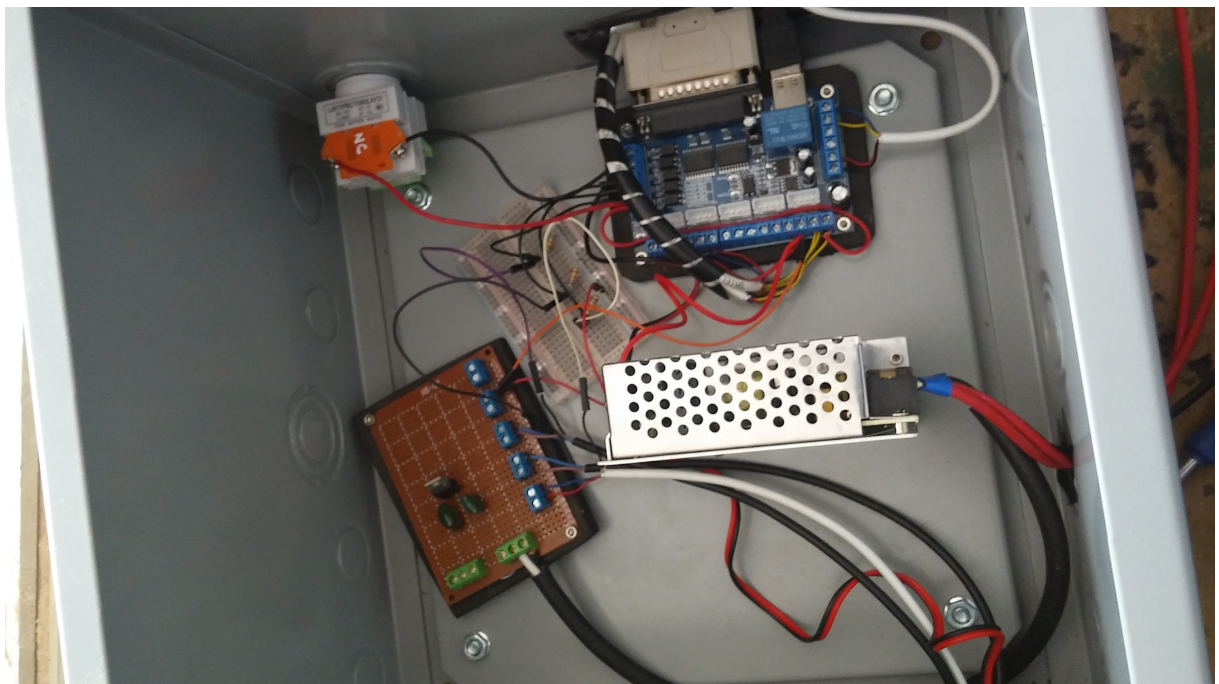
**Figura F.4:** Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia



**Figura F.5:** Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia

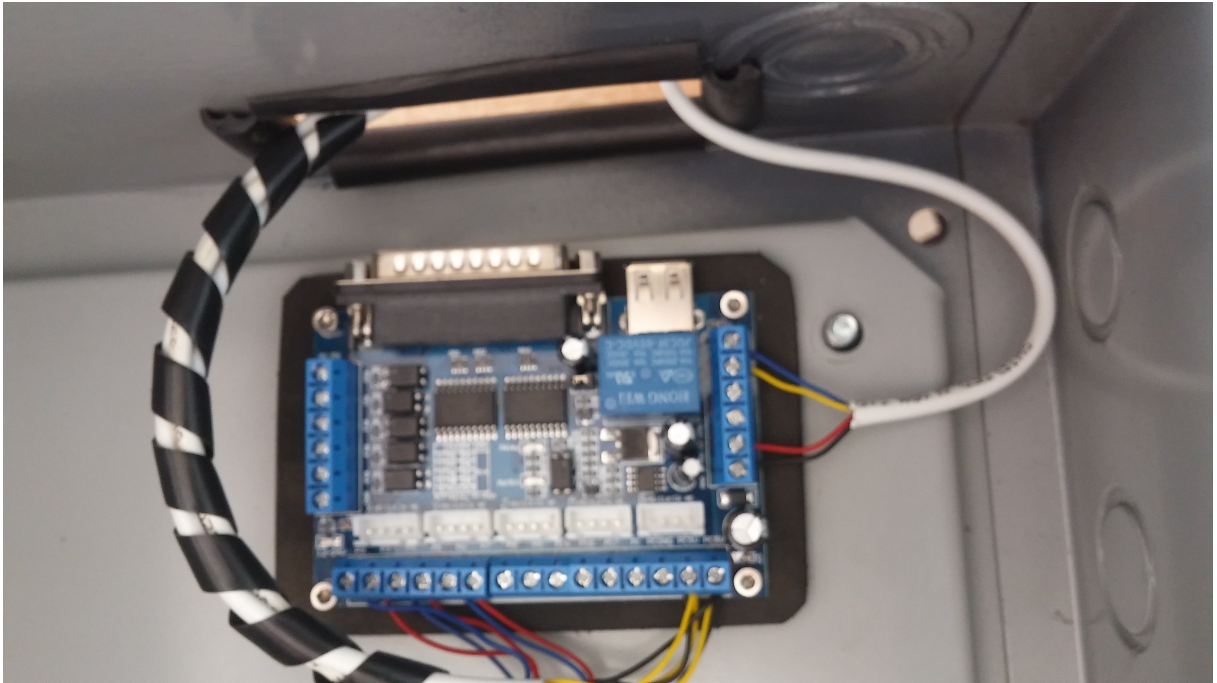


**Figura F.6:** Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia



**Figura F.7:** Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia





**Figura F.8:** Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia



**Figura F.9:** Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia



**Figura F.10:** Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia



**Figura F.11:** Imágenes varias del progreso de la máquina. Fuente: elaboración propia